



Il Modello Standard

Luca Lista

INFN

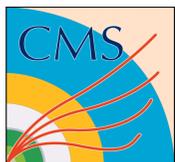


Il Modello Standard

...in mezz'ora

Luca Lista

INFN



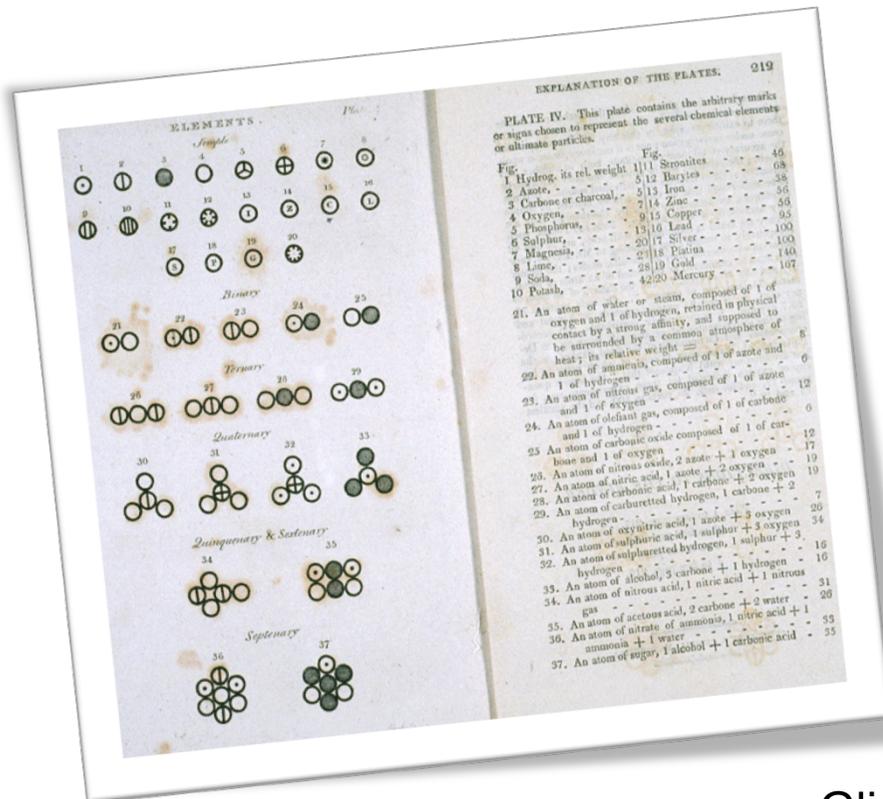
Cos'è il Modello Standard?



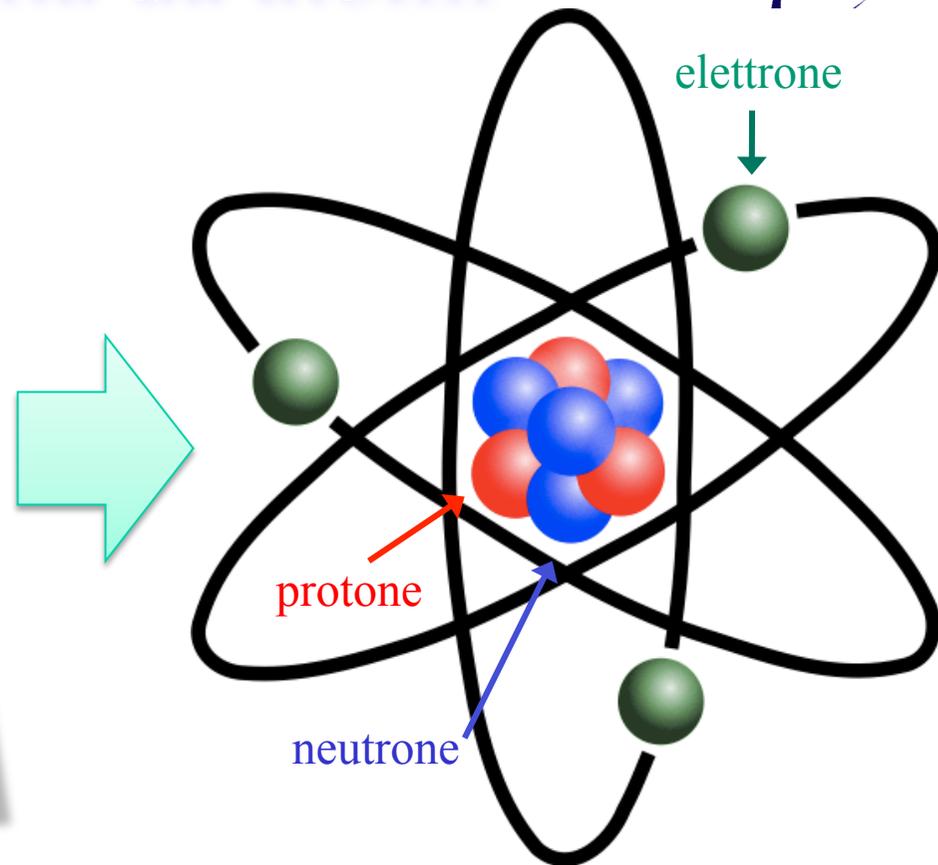
- È un **modello matematico** che descrive:
 - Le particelle che costituiscono tutta la materia che conosciamo
 - Le loro interazioni (= forze) fondamentali
- È un esempio di **unificazione** delle interazioni fondamentali
- **Non descrive tutti i fenomeni noti**
 - Es.: **gravità, materia oscura**
- **Non tutte le sue previsioni sono state confermate**
 - Il **bosone di Higgs** non è ancora stato scoperto



La materia è fatta da atomi



John Dalton,
A New System of Chemical Philosophy (1808),



Gli elettroni (-) e il nucleo (+) sono tenuti insieme dalla **forza elettrica**
Una **forza (forte)** deve tenere insieme protoni e neutroni dentro il nucleo, che altrimenti si respingerebbero per la forza coulombiana



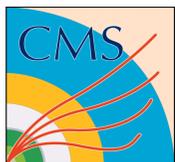
La meccanica quantistica



- Il moto degli elettroni attorno al nucleo è governato dalla **Meccanica Quantistica**
- All'elettrone è associata una **funzione d'onda** che rappresenta l'ampiezza di **probabilità** di trovarla ad una certa posizione
- L'**equazione di Schrödinger** governa l'evoluzione della funzione d'onda

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \psi = \left(-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V \right) \psi$$

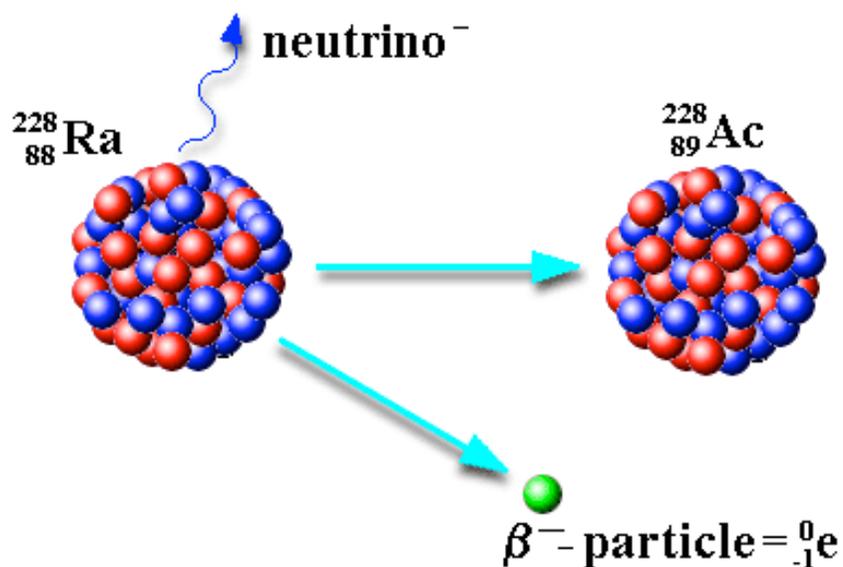
- Inattese conseguenze: dualismo **onda-particella**, **principio di indeterminazione**, **casualità intrinseca**...



Decadimenti beta



- Alcuni nuclei atomici decadono emettendo **elettroni** (radiazione β). Nel decadimento un **neutrone** si trasforma in un **protone**
- Deve essere emessa una particella invisibile (**neutrino**) che garantisce la conservazione di energia e momento



I decadimenti β avvengono con la reazione:



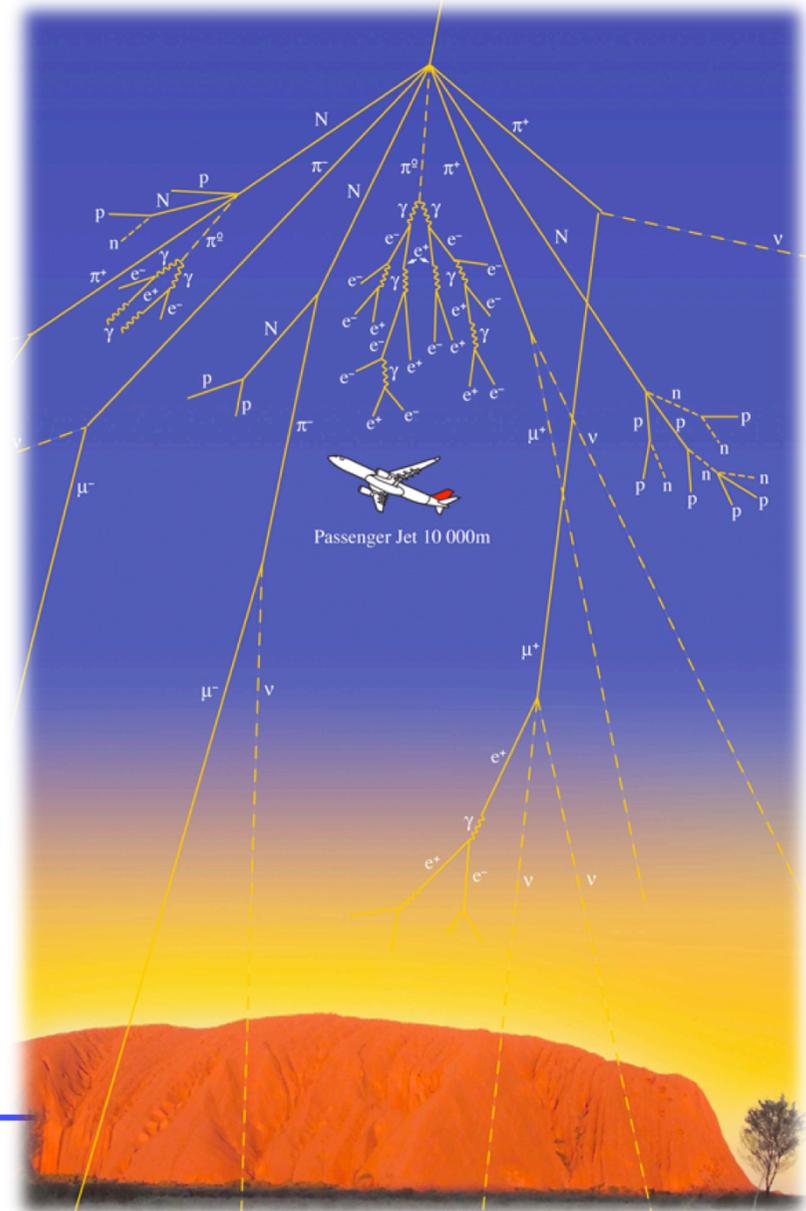
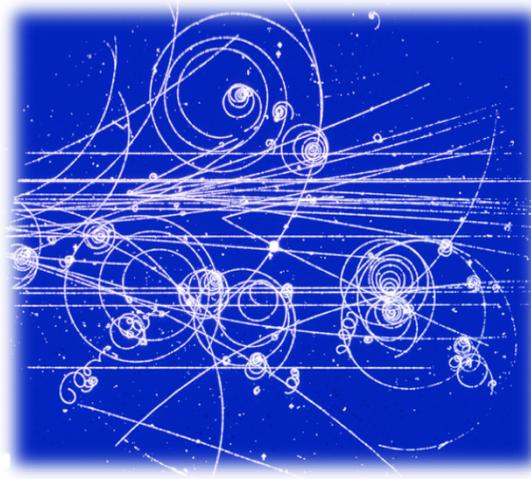
La rarità dei decadimenti β indica che sono dovuti ad un'interazione $\sim 10^{11}$ volte più **debole** della forza elettromagnetica

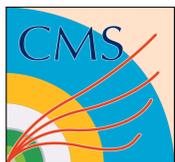


Nuove particelle



- Le prime sorgenti di particelle di alta energia sono stati i **raggi cosmici**
- L'introduzione di **nuove tecniche di rivelazione** ha portato alla scoperta di **nuovi tipi di particelle** e delle loro possibili interazioni con **protoni**, **neutroni** e **elettroni** della materia che conosciamo





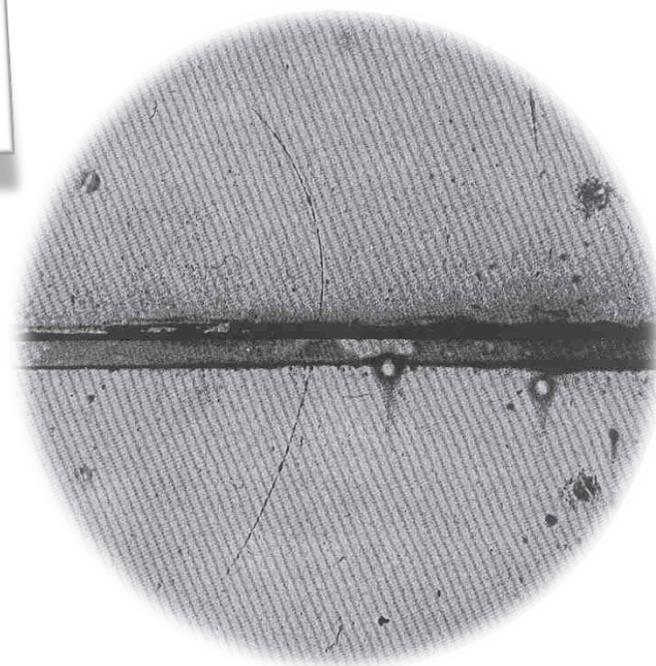
L'antimateria

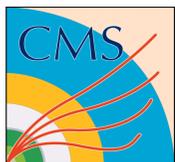


- Paul Dirac estese l'equazione di Schrödinger alla relatività di Einstein ed ha previsto particelle con **energia negativa**, equivalenti a stati con carica elettrica opposta a quella delle particelle ordinarie

$$(-i\gamma^\mu \partial_\mu + m)\psi = 0$$

- Il **positrone** (e^+) è stato scoperto da **Carl Anderson** osservando i raggi cosmici nel 1932, pochi anni dopo la previsione di Dirac

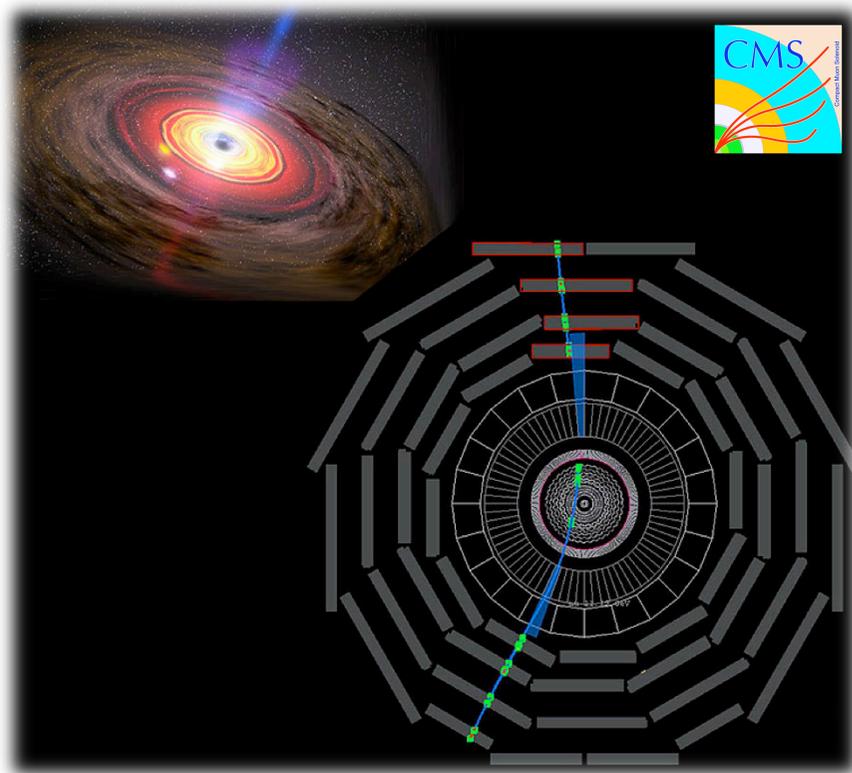




Il muone



- La particella più abbondante che è presente nei raggi cosmici è il **muone**, scoperto da Anderson nel 1936
- Il μ è del tutto simile all'elettrone ma circa 200 volte più pesante
- Il muone è **instabile**, e decade ad un certo punto del suo percorso in **elettrone** e **neutrini**
- I muoni sono le particelle cariche più **penetranti**, possono attraversare spessi strati di materia
- Circa **~ 100 muoni al secondo** raggiungono **ogni metro quadrato** del suolo terrestre





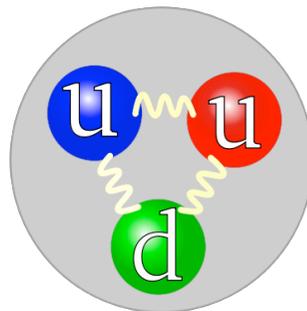
I quark



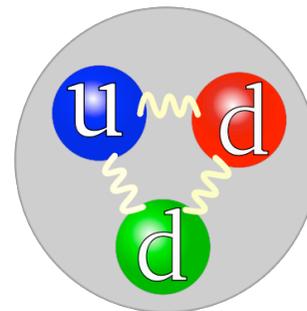
- Il **pione** fu scoperto nei raggi cosmici nel 1947, al quale seguì la scoperta di nuovi tipi di particelle instabili che decadevano ciascuna in altre particelle
- La presenza dei diversi tipi di particelle può essere spiegata in termini di costituenti elementari: i **quark**, con carica elettrica multipla di $1/3$
- Protone e neutrone sono costituiti da tre quark, Il pione è composto da un quark ed un anti-quark

Up: $+ 2/3$

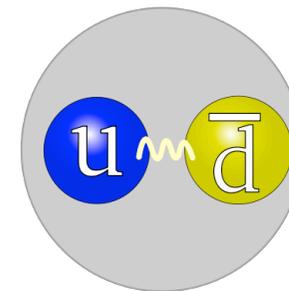
Down: $-1/3$



Protone: +1



Neutrone: 0



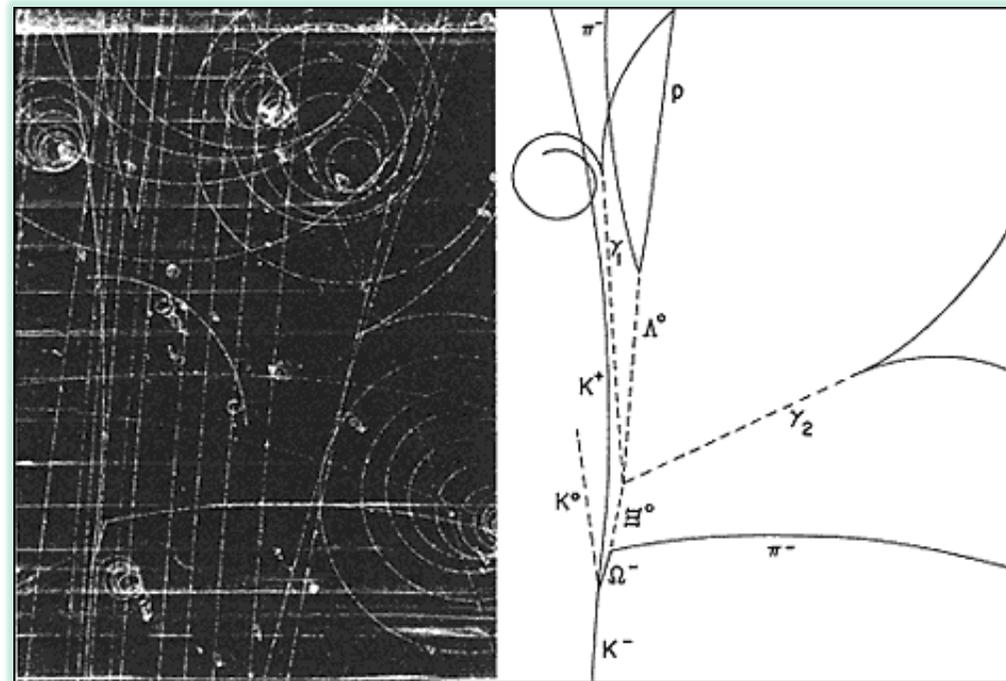
Pione $-\pi^+$



Il quark “strano”



- Nel 1947 fu scoperta in interazioni con i raggi cosmici una particella che decadeva in due pioni: $K \rightarrow \pi^+ \pi^-$, ma di massa molto maggiore del pione
- Seguirono, soprattutto grazie all'uso degli **acceleratori**, scoperte di **numerose particelle** instabili che potevano **decadere** le une nelle altre, con precise regole di selezione
- Le diverse particelle si spiegavano con l'introduzione del terzo **quark strano**

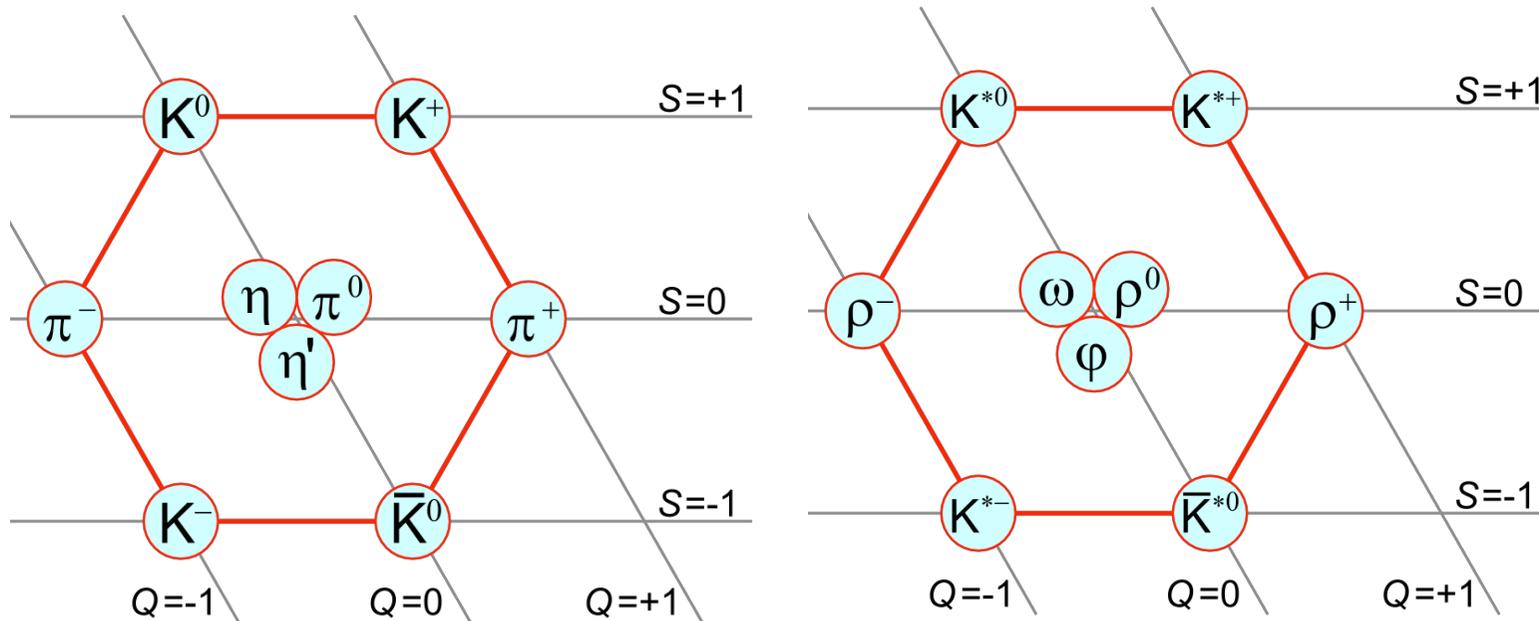




Quark e anti-quark



- Il modello a quark è come la **tavola periodica degli elementi** delle particelle
- Coppie quark + anti-quark formano i **mesoni**, tra i quali il **pione** e i **kaoni**



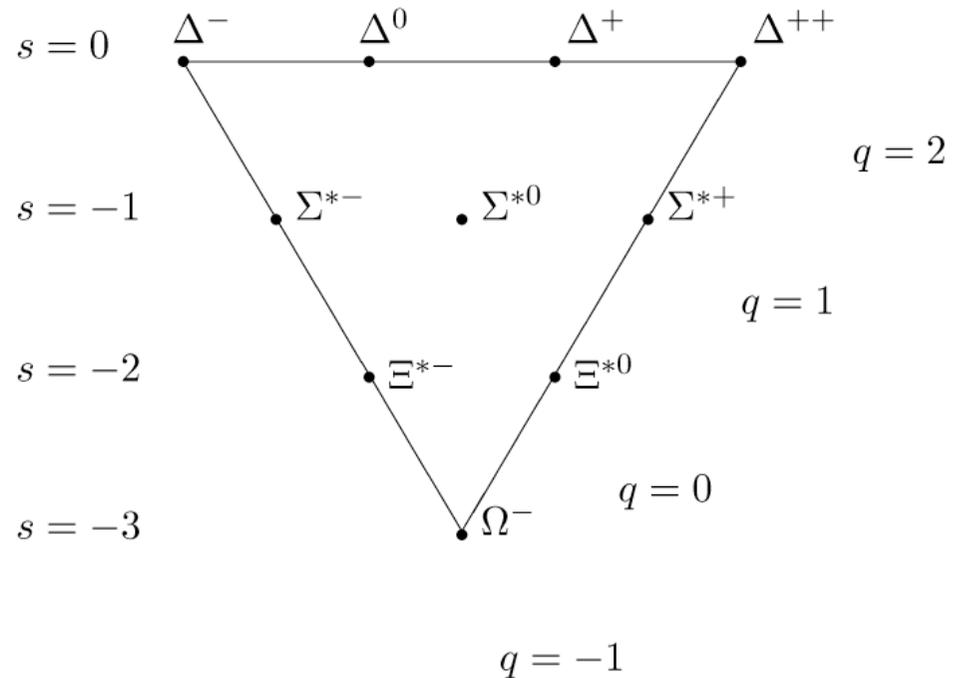
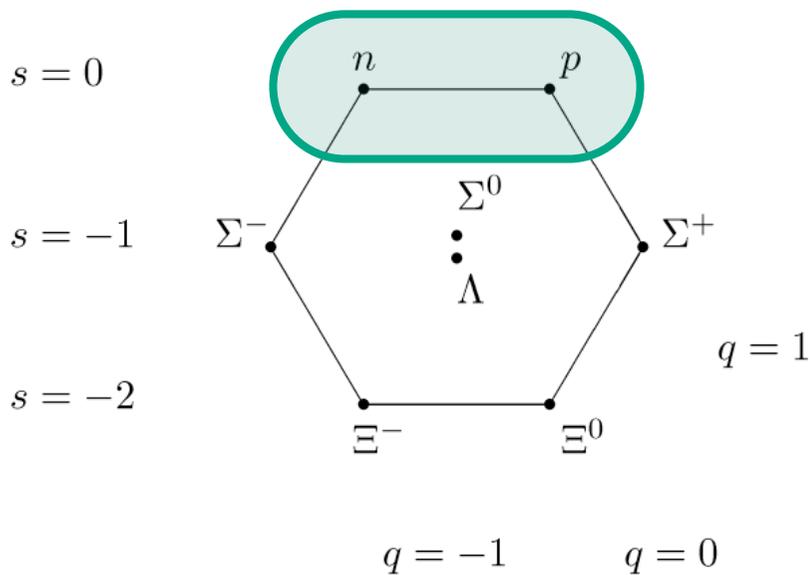


Mesoni e barioni



- Terne di quark formano i **barioni**, tra i quali il **protone** e il **neutrone**

materia ordinaria

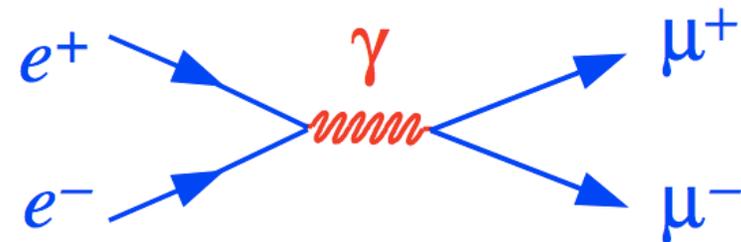
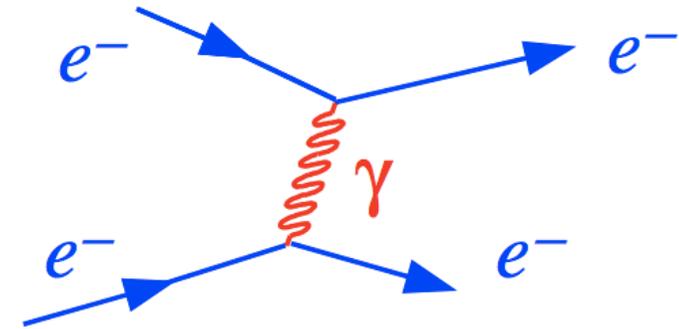


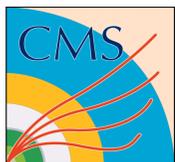


Quantizzazione della luce



- L'interazione elettromagnetica può essere trattata in meccanica quantistica come emissione ed assorbimento di **fotoni**
- I processi elementari di scambio di mediatori di forza prendono il nome di **diagrammi di Feynman**
- Il **dualismo onda-particella** è presente anche per i campi di forza, oltre che per le particelle che costituiscono la materia
- Gli stessi diagrammi prevedono l'**annichilazione** di elettroni e positroni per creare nuove particelle, come ai collider

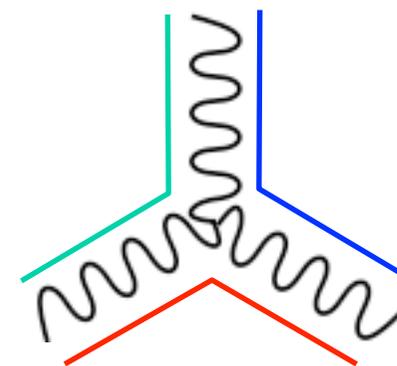




Interazioni e simmetrie



- La presenza di **particelle che mediano le interazioni** fondamentali si può collegare con **principi di simmetria** dei campi quantistici di materia
- Questo viene formulato matematicamente nelle **teorie di gauge**
- L'interazione elettromagnetica si può introdurre con l'**invarianza di gauge** (matematicamente: gruppo $U(1)$) del campo elettromagnetico e della funzione d'onda degli elettroni, dando luogo all'**elettrodinamica quantistica (QED)**
 - La particella che media l'interazione e.m. è il **fotone**, che è elettricamente **neutro**
- Allo stesso modo, anche l'interazione forte può essere descritta dalla **cromodinamica quantistica (QCD)**, ma con una simmetria più complessa ($SU(3)$)
 - La particella che media l'interazione forte è il **gluone**
 - La presenza di tre tipi di carica forte nei quark ("colore": **rosso**, **verde**, **blu**), e che i gluoni sono tutti "carichi" di carica forte spiega il confinamento dei quark all'interno di mesoni e barioni
- Anche le interazioni deboli discendono da un principio di simmetria, ma con qualche complicazione

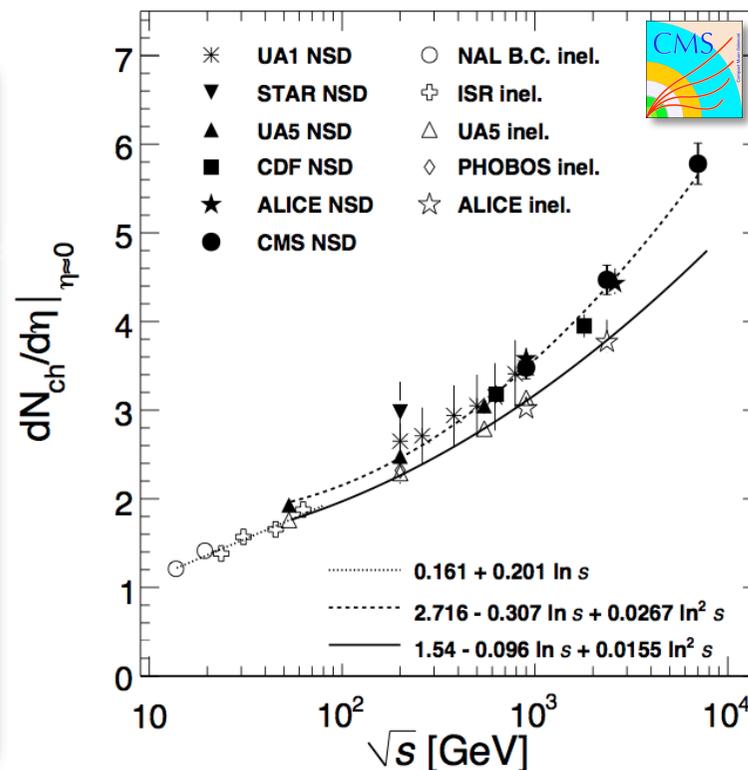
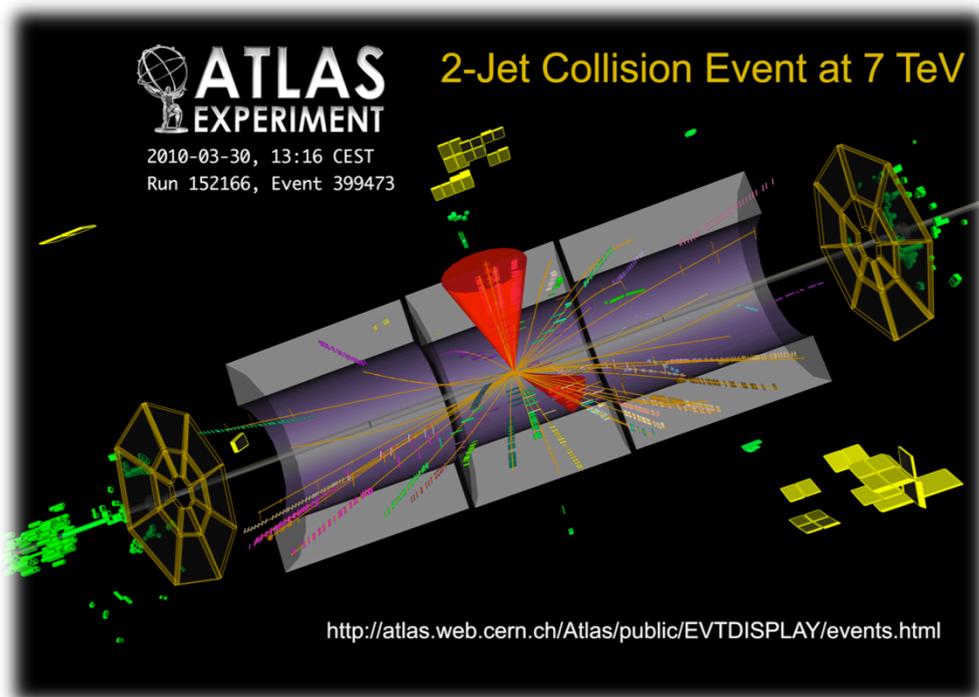




I quark e i jet



- I quark non possono essere osservati come **particelle libere**, ma solo nei loro stati legati (confinamento)
- La produzione di quark di alta energia si manifesta con gruppi di particelle ($E=mc^2$) detti jet che contengono i prodotti della **frammentazione** dei quark

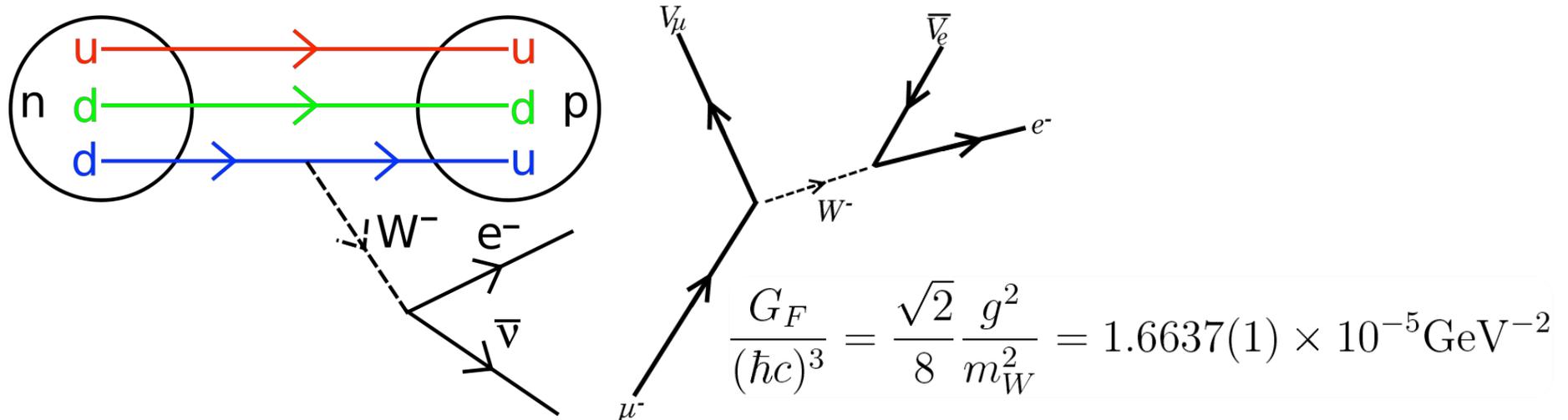




Il decadimento β e i quark



- Il decadimento β è simile ad altri decadimenti **deboli** di mesoni e barioni e del muone, ed è dovuto ad un processo che interessa un singolo quark
- La debolezza dell'interazione è dovuta alla bassa probabilità di emettere una **particella W** molto pesante del fotone che ha massa nulla
- Le particelle W e Z sono state scoperte da **Carlo Rubbia** (1983), e sono circa 80 – 90 volte più pesanti del protone

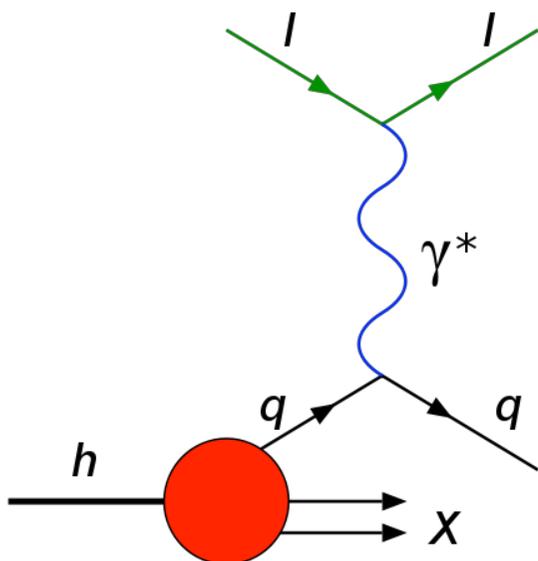




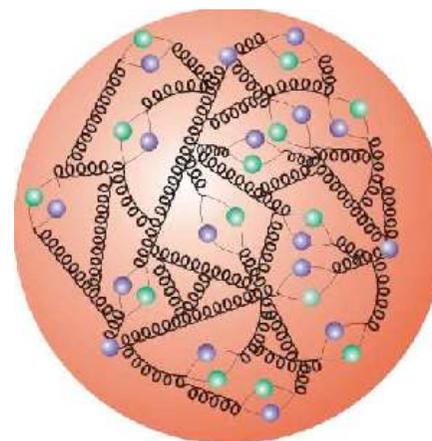
Deep inelastic scattering



- La struttura interna del protone può essere studiata con delle sonde che hanno **energia** e **potere risolutivo** sufficiente a penetrarne la struttura interna
- I risultati delle misure confermano il modello a quark
 - E trovano una struttura interna molto complessa, piena di gluoni e quark **virtuali**



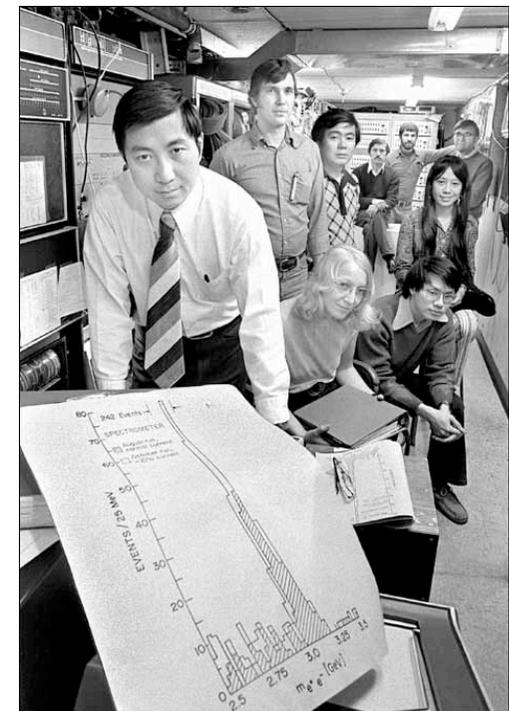
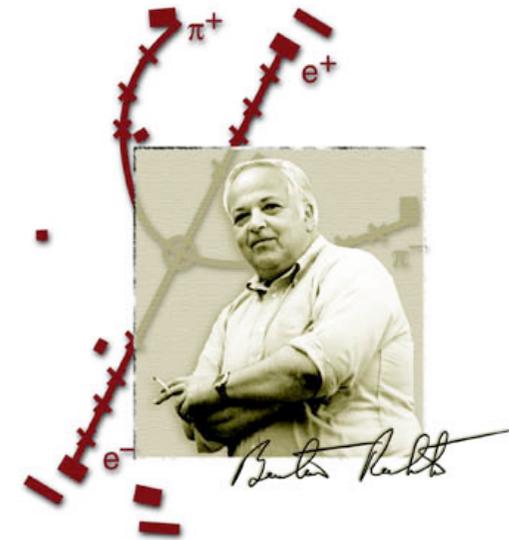
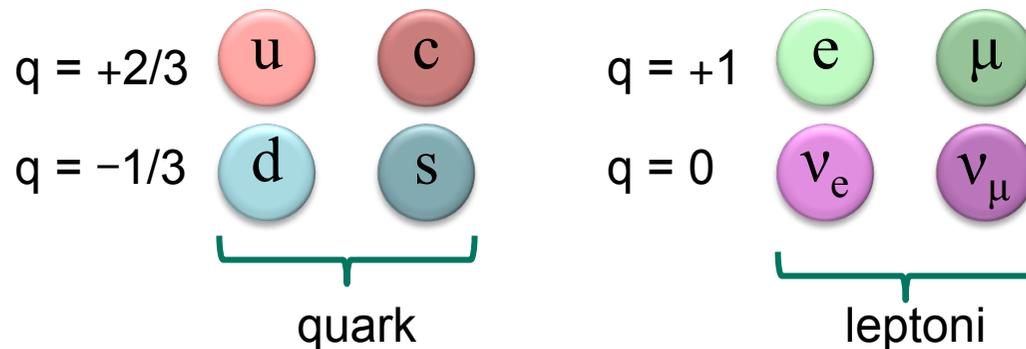
$$\lambda = \frac{hc}{E}$$

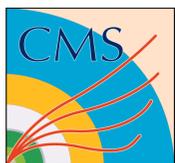




Il quark charm

- Da osservazioni indirette delle proprietà di decadimento dei mesoni K fu ipotizzata nel 1970 da **Glashow, Iliopoulos e Maiani**, la presenza di un quarto quark, **il quark charm**,
- La scoperta seguì nel 1974 da parte di **Richter e Ting** della particella **J/ψ** , mesone fatto da una coppia di quark e antiquark charm
- Le particelle elementari formavano **due famiglie** di **quark** e **leptoni**

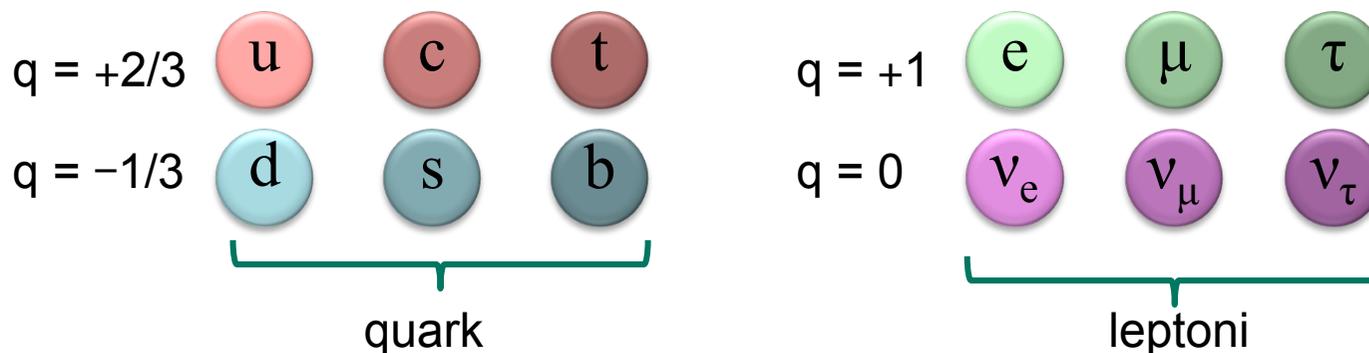
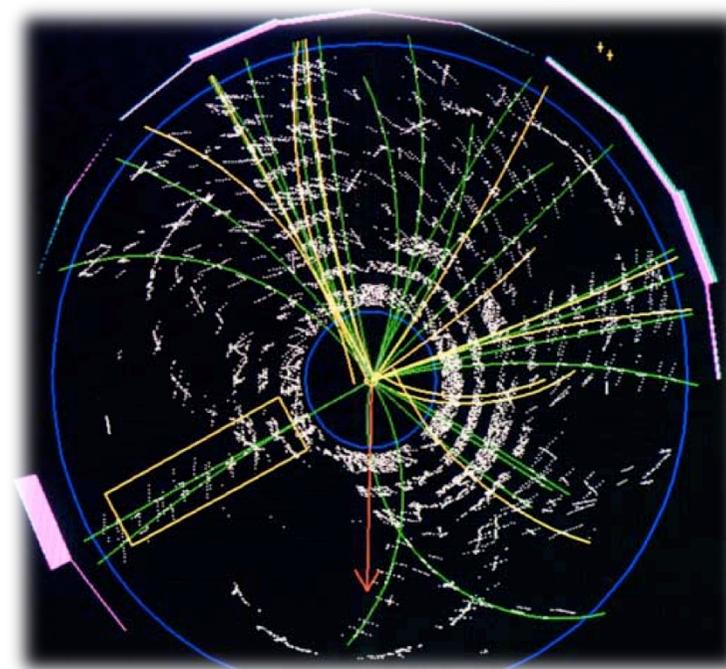


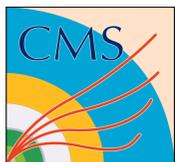


La terza famiglia



- La terza famiglia di quark è necessaria per spiegare l'**asimmetria** tra materia ed antimateria, ingrediente necessario a spiegare l'evoluzione dell'universo
- Ipotizzata da **Kobayashi e Maskawa**
 - **1975**: scoperta del leptone tau a SLAC in collisioni elettrone-positrone
 - **1977**: scoperta del quark b (mesone Y) in collisioni di protoni su bersaglio fisso
 - **1991**: il LEP prova indirettamente l'esistenza di un terzo neutrino in collisioni elettrone-positrone
 - **1995**: il Tevatron scopre il quark top in collisione protone-antiprotone

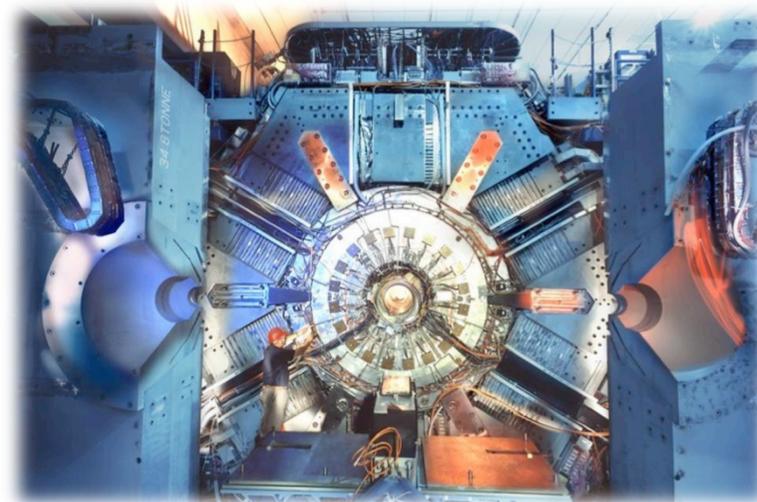
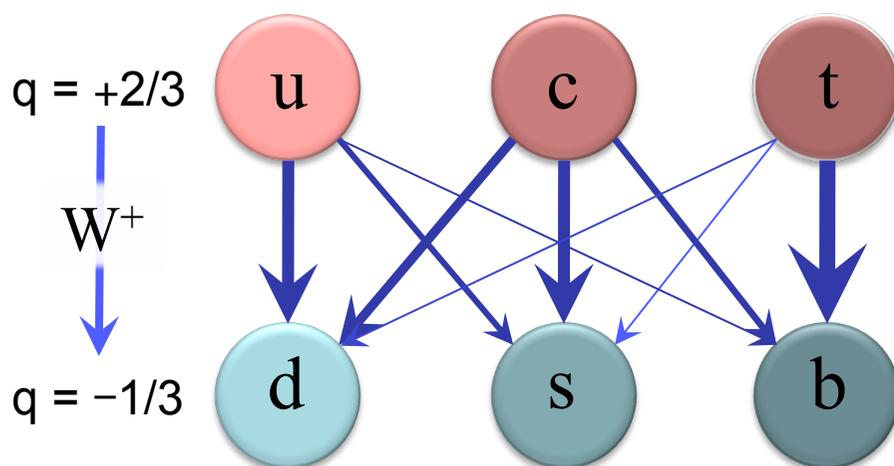




Il mixing tra i quark



- I decadimenti deboli possono avvenire tra quark di tipo (“sapore”) diverso con l'emissione di una particella W
- Le transizioni hanno però diversa intensità, che viene misurata da una matrice (complessa) detta di Cabibbo-Kobayashi-Maskawa
- Un elemento immaginario della matrice spiega l'asimmetria tra materia ed antimateria (violazione di CP) necessaria per spiegare l'estinzione dell'antimateria nell'universo attuale

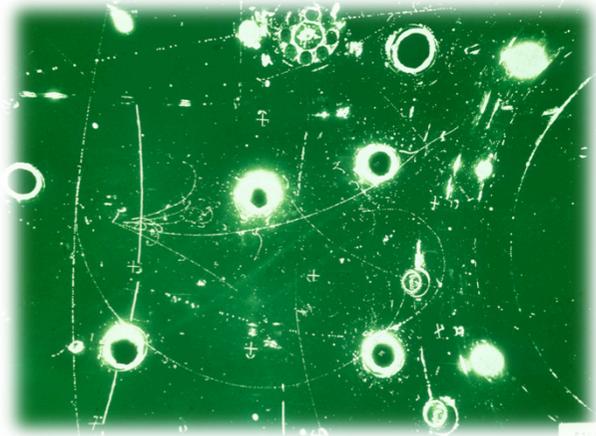




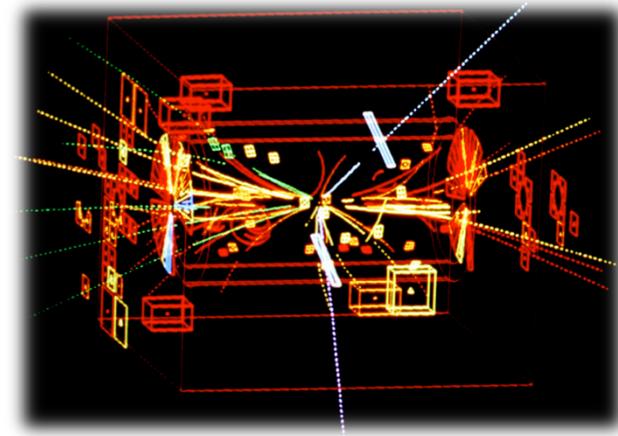
Forze e particelle



- Ogni interazione fondamentale è associata ad una struttura matematica chiamata gruppo di simmetria
- $U(1)$ → Interazione e.m. mediata dal fotone: γ
- $SU(3)$ → Interazione forte mediata da 8 gluoni: g
- $SU(2)$ → Interazioni deboli mediate da W^+ , W^0 , W^- ?
- Non è così semplice:
 - I campi W hanno inaspettatamente una **massa**, mentre fotone e gluoni hanno massa nulla
 - Il campo W^0 non è una particella, è necessario un “mixing” con il campo del gruppo $U(1)$: le particelle fisiche sono il fotone, γ , e la Z , anch’essa massiva



Ma come possono W e Z avere massa se le teorie di gauge prevedono particelle mediatrici senza massa?

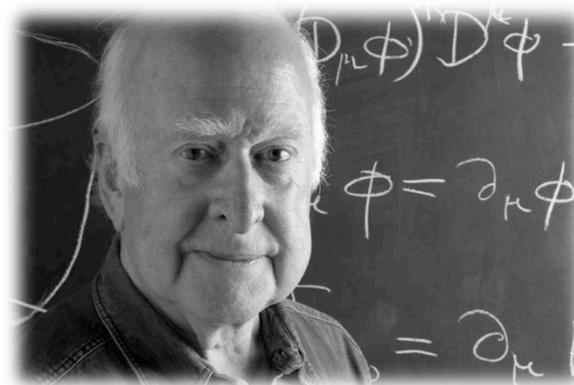




Il bosone di Higgs



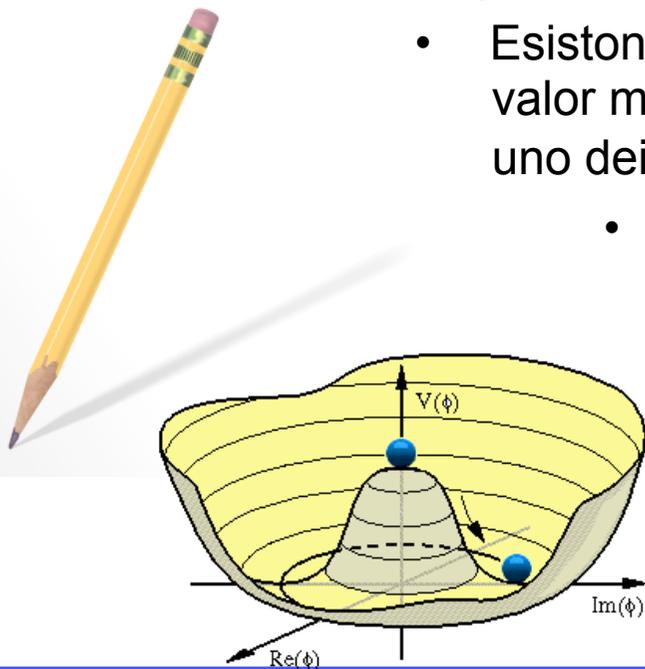
- Il meccanismo di **rottura spontanea della simmetria**, preso a prestito dalla struttura della materia, spiega la presenza di particelle che hanno massa
- La simmetria è in realtà “**nascosta**” da un nuovo campo, **il campo di Higgs**, che, a differenza degli altri campi, non ha valore nullo nel vuoto



- Esistono diversi stati di vuoto possibili, tutti con uguale valor medio del campo di Higgs. La natura ne sceglierà uno dei possibili

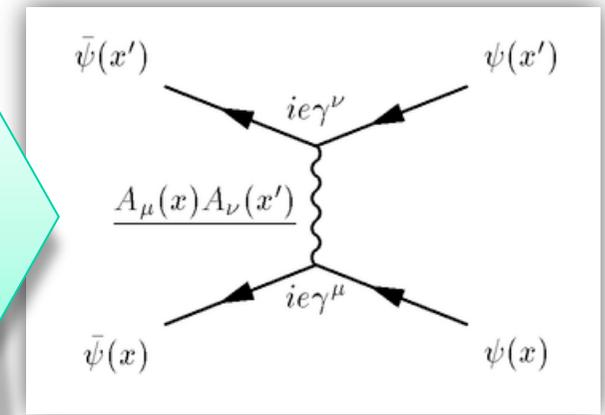
- L'interazione delle particelle con il campo di Higgs, anche nel vuoto genera la loro **massa** che è tanto maggiore quanto più grande è la loro interazione

Come effetto collaterale, il campo di Higgs si manifesta con una nuova particella: il **bosone di Higgs**, fino ad ora cercato ma mai osservato



- Matematicamente si definisce una funzione, detta **lagrangiana**, alla quale corrispondono i **diagrammi di Feynman** possibili e le regole per il loro calcolo

$$\begin{aligned}
 \mathcal{L}_{GWS} = & \sum_f (\bar{\Psi}_f (i\gamma^\mu \partial_\mu - m_f) \Psi_f - e Q_f \bar{\Psi}_f \gamma^\mu \Psi_f A_\mu) + \\
 & - \frac{g}{\sqrt{2}} \sum_i (\bar{a}_L^i \gamma^\mu b_L^i W_\mu^+ + \bar{b}_L^i \gamma^\mu a_L^i W_\mu^-) + \frac{g}{2c_w} \sum_f \bar{\Psi}_f \gamma^\mu (I_f^3 - 2s_w^2 Q_f - I_f^3 \gamma_5) \Psi_f Z_\mu + \\
 & - \frac{1}{4} |\partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu - ie(W_\mu^- W_\nu^+ - W_\mu^+ W_\nu^-)|^2 - \frac{1}{2} |\partial_\mu W_\nu^+ - \partial_\nu W_\mu^+ + \\
 & \quad - ie(W_\mu^+ A_\nu - W_\nu^+ A_\mu) + ig' c_w (W_\mu^+ Z_\nu - W_\nu^+ Z_\mu)|^2 + \\
 & \quad - \frac{1}{4} |\partial_\mu Z_\nu - \partial_\nu Z_\mu + ig' c_w (W_\mu^- W_\nu^+ - W_\mu^+ W_\nu^-)|^2 + \\
 & - \frac{1}{2} M_\eta^2 \eta^2 - \frac{g M_\eta^2}{8 M_W} \eta^3 - \frac{g'^2 M_\eta^2}{32 M_W} \eta^4 + |M_W W_\mu^+ + \frac{g}{2} \eta W_\mu^+|^2 + \\
 & + \frac{1}{2} |\partial_\mu \eta + i M_Z Z_\mu + \frac{ig}{2c_w} \eta Z_\mu|^2 - \sum_f \frac{g}{2} \frac{m_f}{M_W} \bar{\Psi}_f \Psi_f \eta
 \end{aligned}$$





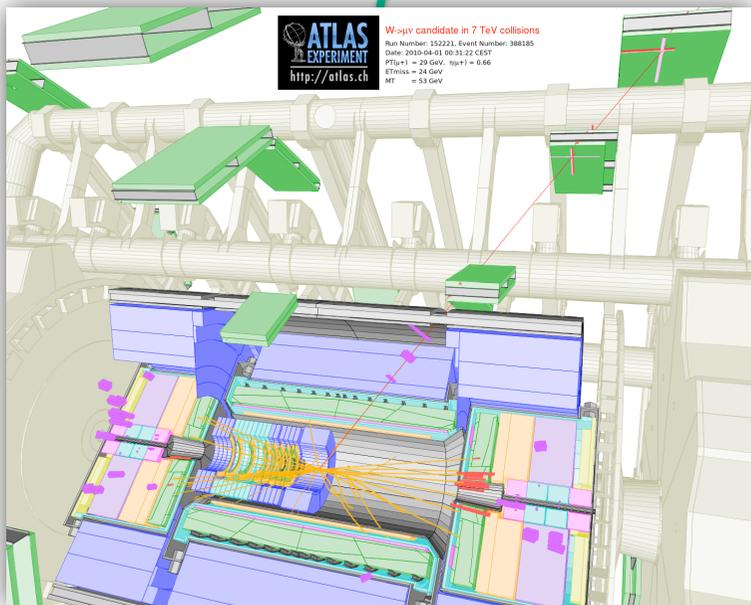
Unificazione elettro-debole



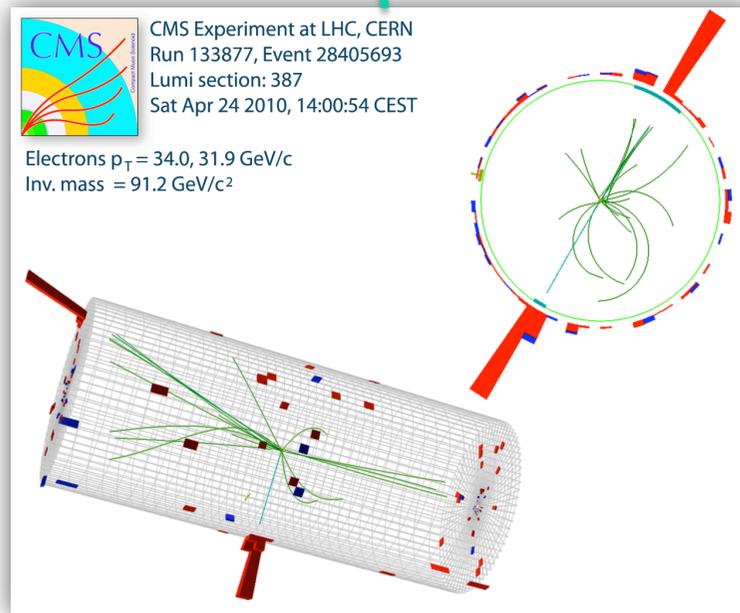
γ



$W^+ \rightarrow \mu^+ \nu$

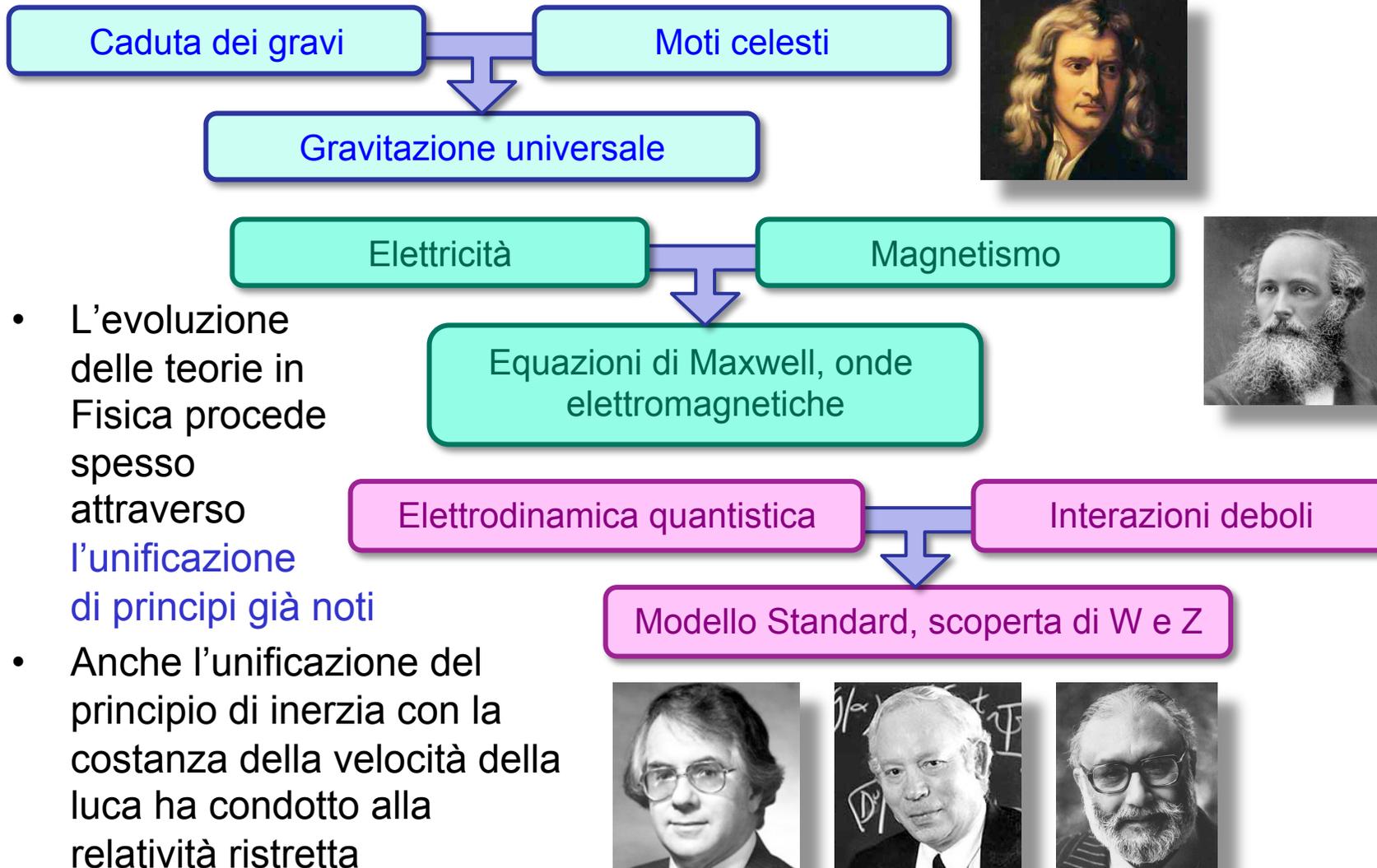


$Z \rightarrow e^+ e^-$





Unificazione delle interazioni

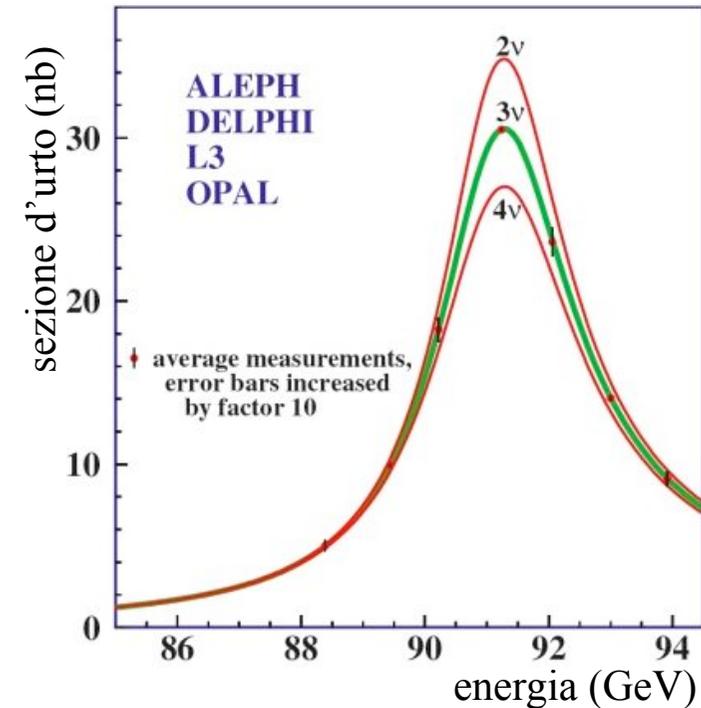
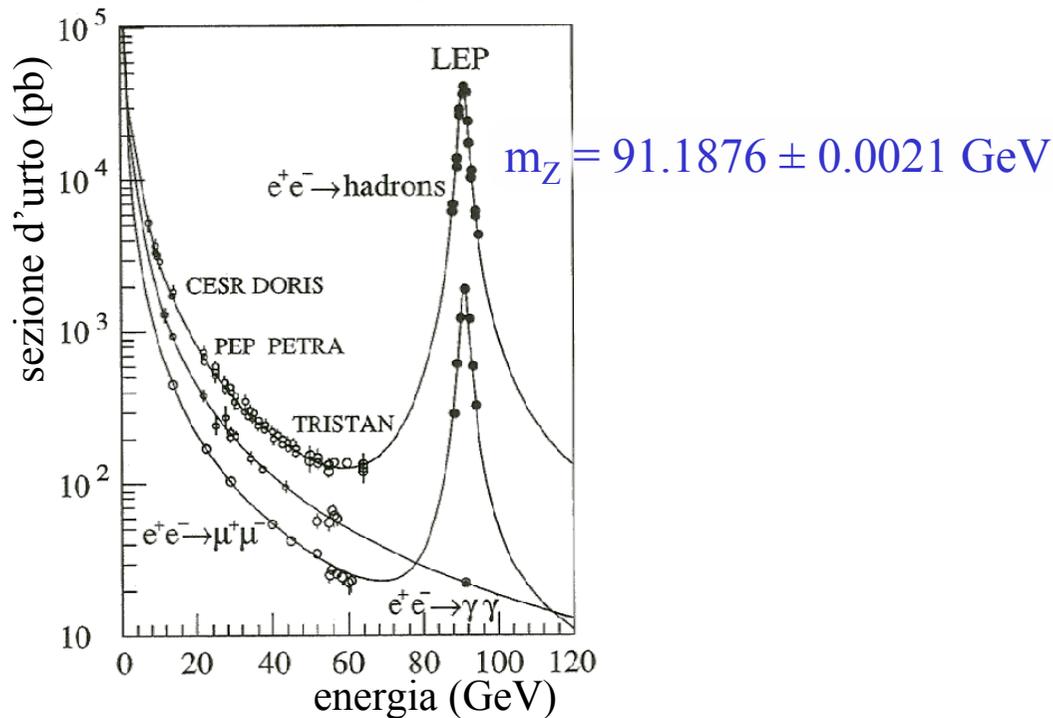




Verifiche del Modello Standard



- Scoperta di **W** e **Z** al CERN, 1983
- Misure di precisione al **LEP** e **SLC** in collisioni elettrone-positrone con energia (1989-2000)
- Energia di lavoro intorno alla massa della Z (risonanza!)
- Misure di precisione da milioni di decadimenti della Z

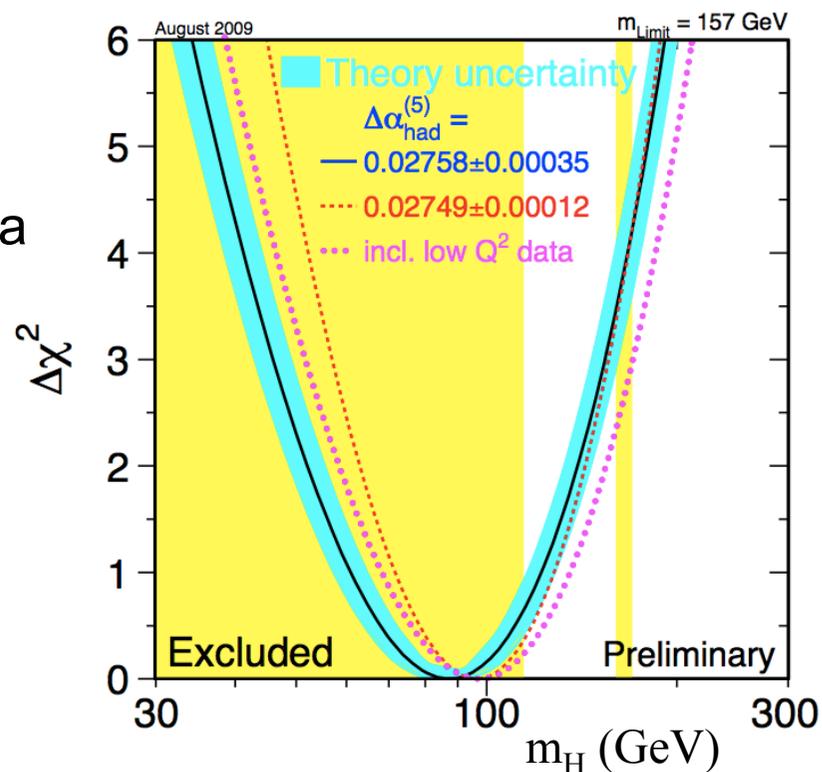
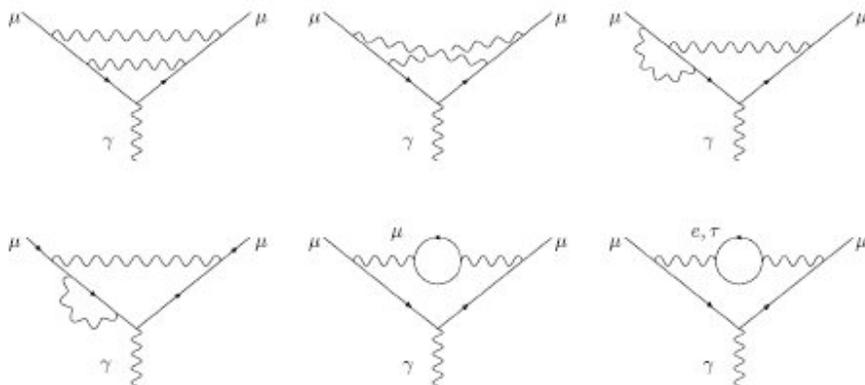




Previsioni sul bosone di Higgs



- I processi quantistici possono coinvolgere lo scambio di **particelle virtuali**, anche se di massa troppo grande per essere prodotte direttamente
- Molti processi al LEP possono contenere scambi di particelle di Higgs virtuali
- Dalle misure di precisione è possibile inferire **indirettamente** il valore **più probabile** della massa del bosone di Higgs

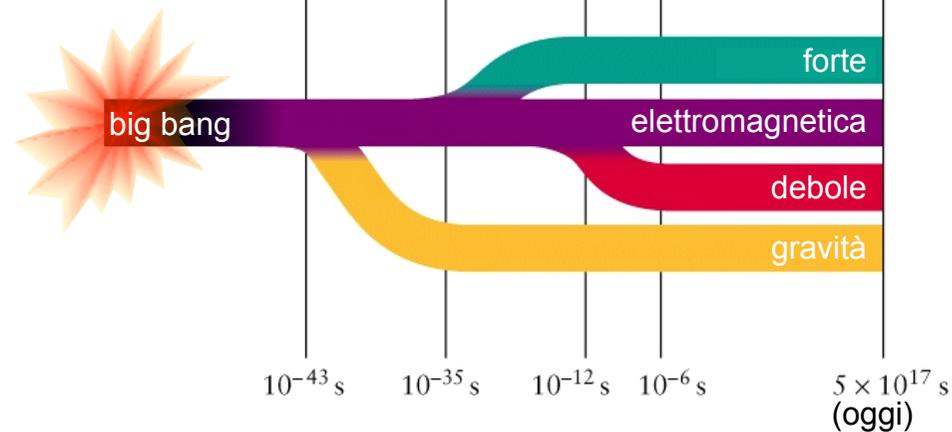
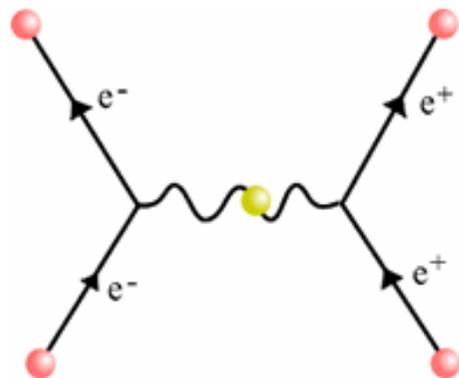
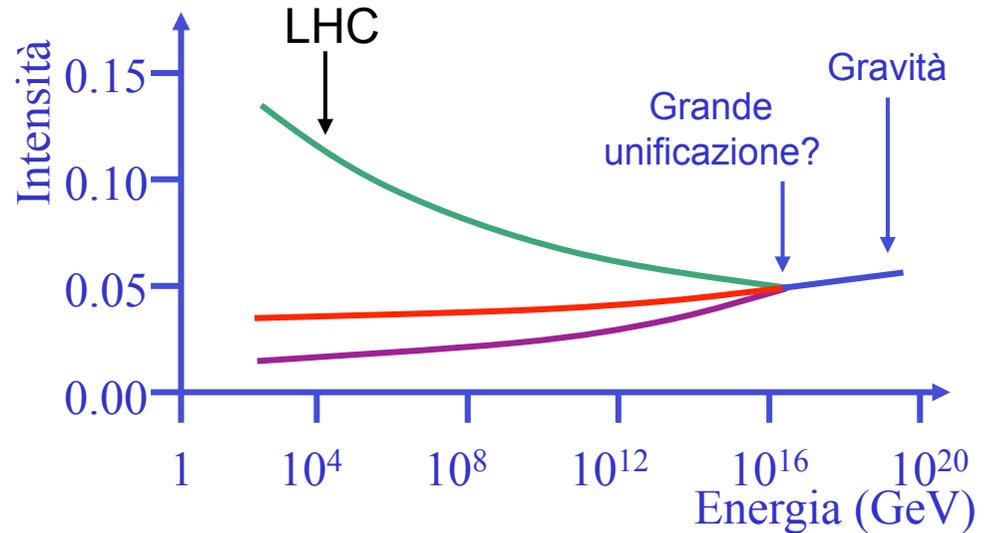




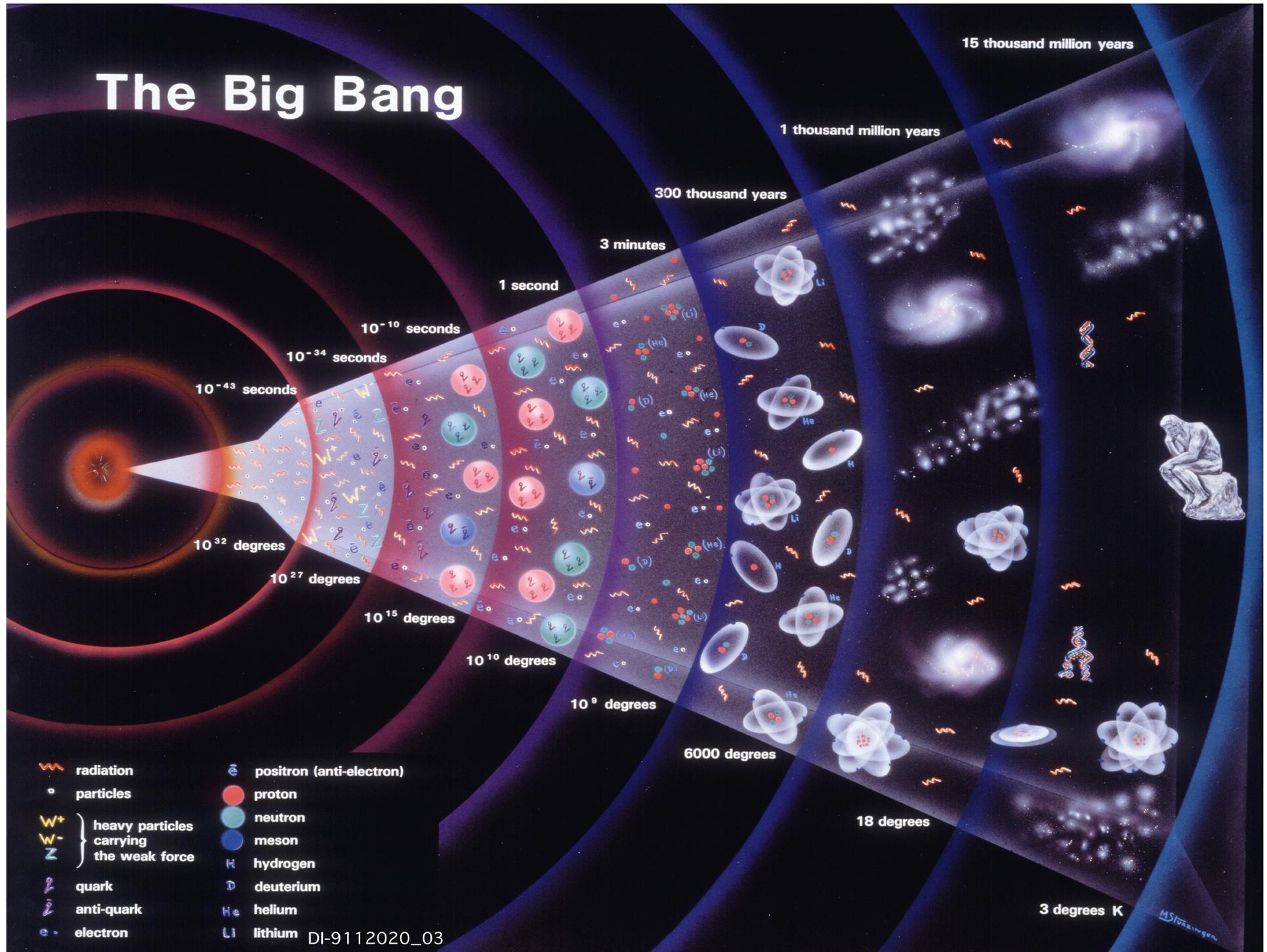
La Grande Unificazione



- Ognuna delle quattro interazioni fondamentali è mediata da una particella (bosone vettore)
- Il Modello Standard unifica le interazioni elettromagnetiche e nucleare debole
- È possibile che tutte le forze siano in realtà unificate in un'unica interazione fondamentale?



The Big Bang

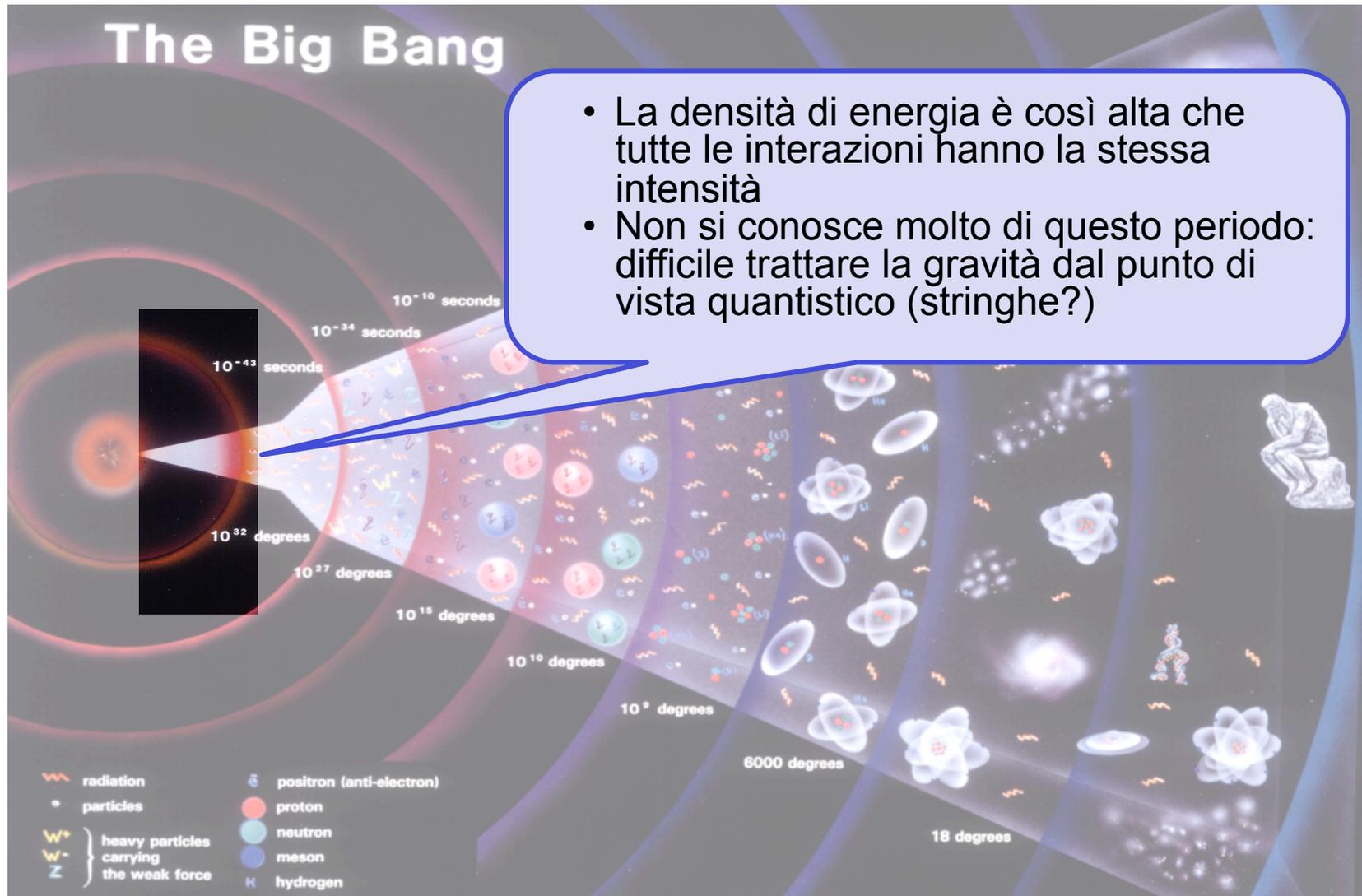


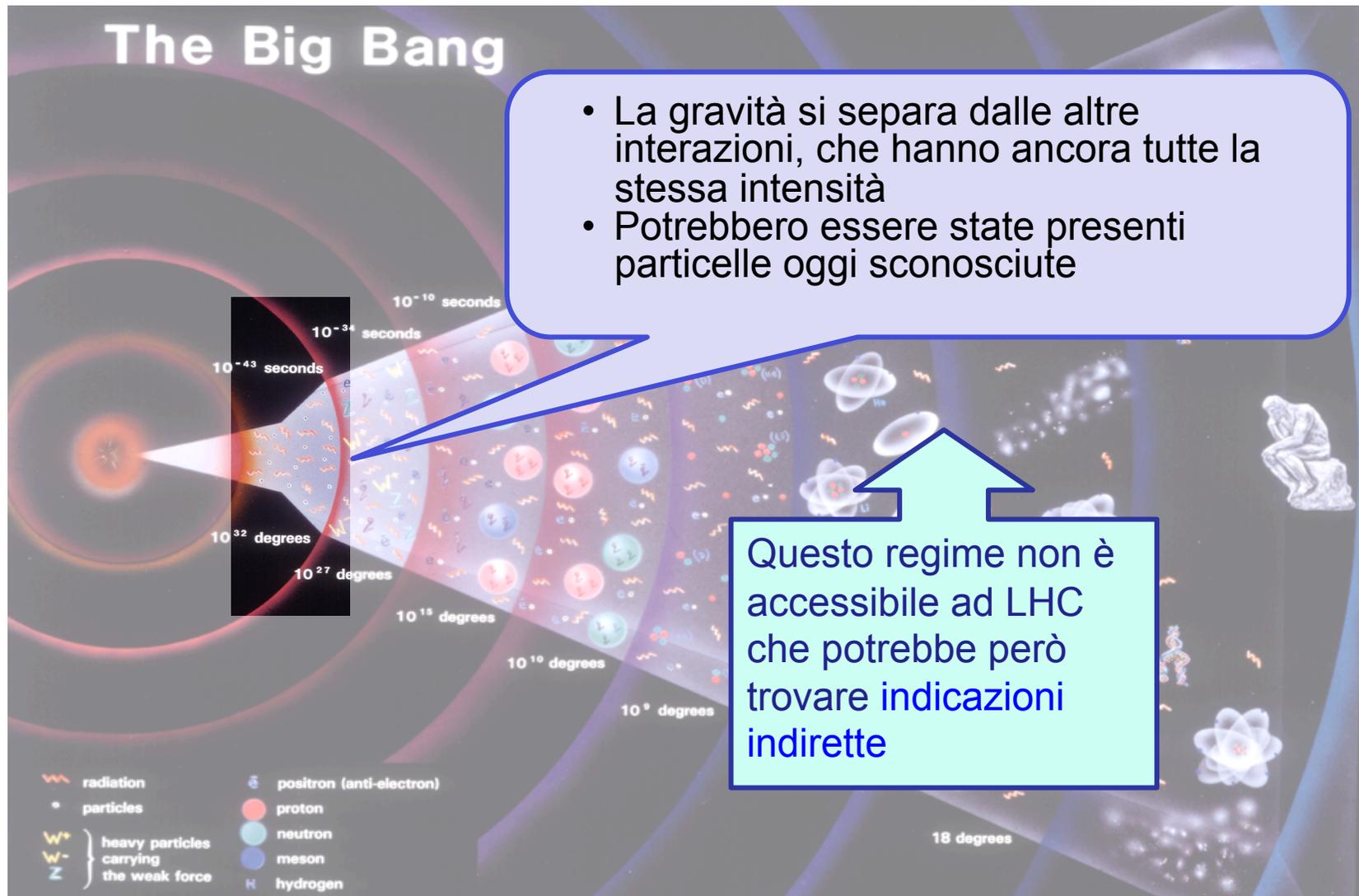
- | | |
|---|--|
|  radiation |  positron (anti-electron) |
|  particles |  proton |
|  } heavy particles |  neutron |
|  } carrying |  meson |
|  } the weak force |  hydrogen |
|  quark |  deuterium |
|  anti-quark |  helium |
|  electron |  lithium |

DI-9112020_03

M. S. ...

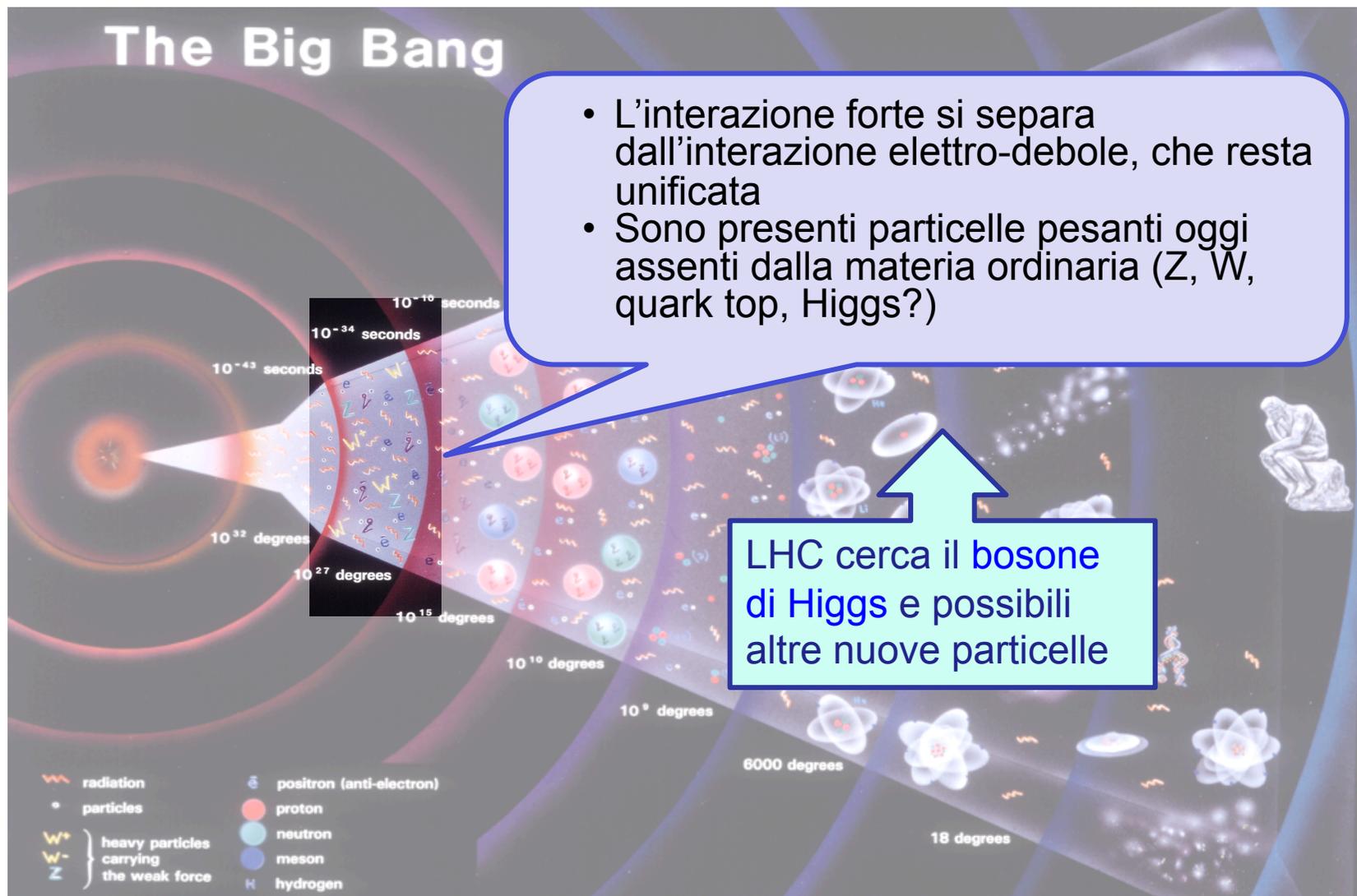
Epoca di Plank ($<10^{-43}$ s)

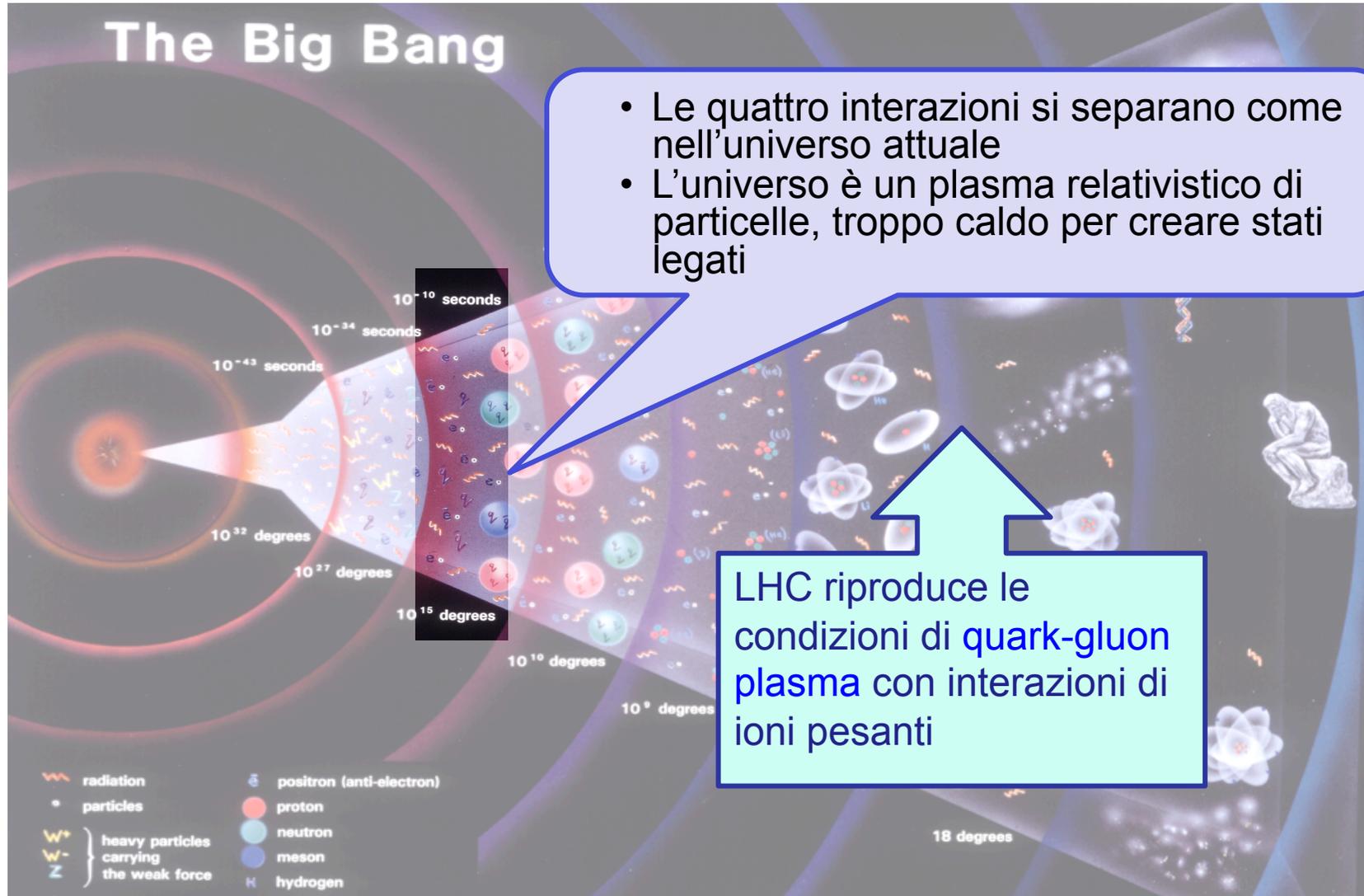




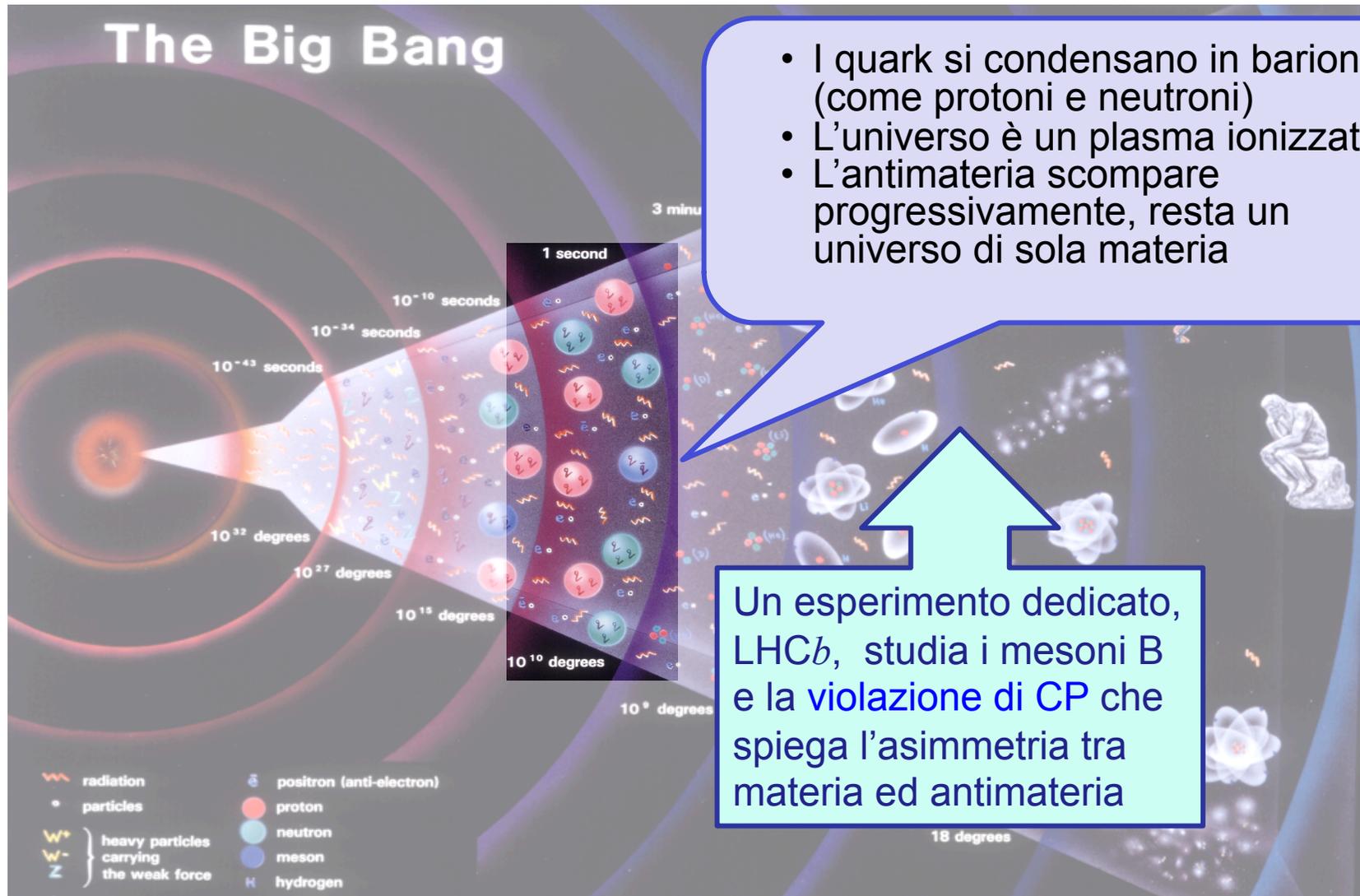


Epoca elettrodebole ($<10^{-12}s$)





Bariogenesi (<1s)



- I quark si condensano in barioni (come protoni e neutroni)
- L'universo è un plasma ionizzato
- L'antimateria scompare progressivamente, resta un universo di sola materia

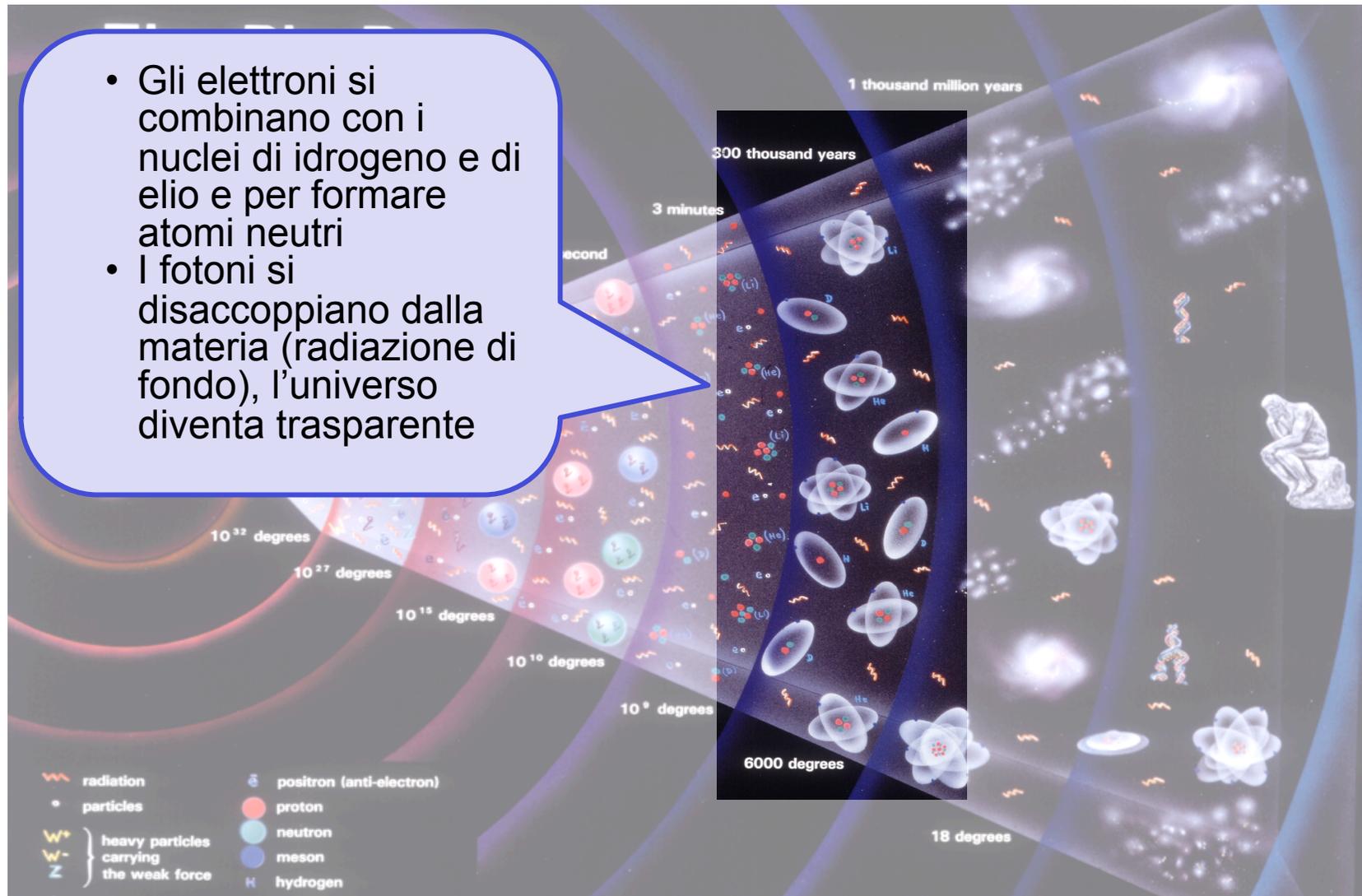
Un esperimento dedicato, LHC**b**, studia i mesoni B e la **violazione di CP** che spiega l'asimmetria tra materia ed antimateria



Gli atomi (240000÷300000 anni)



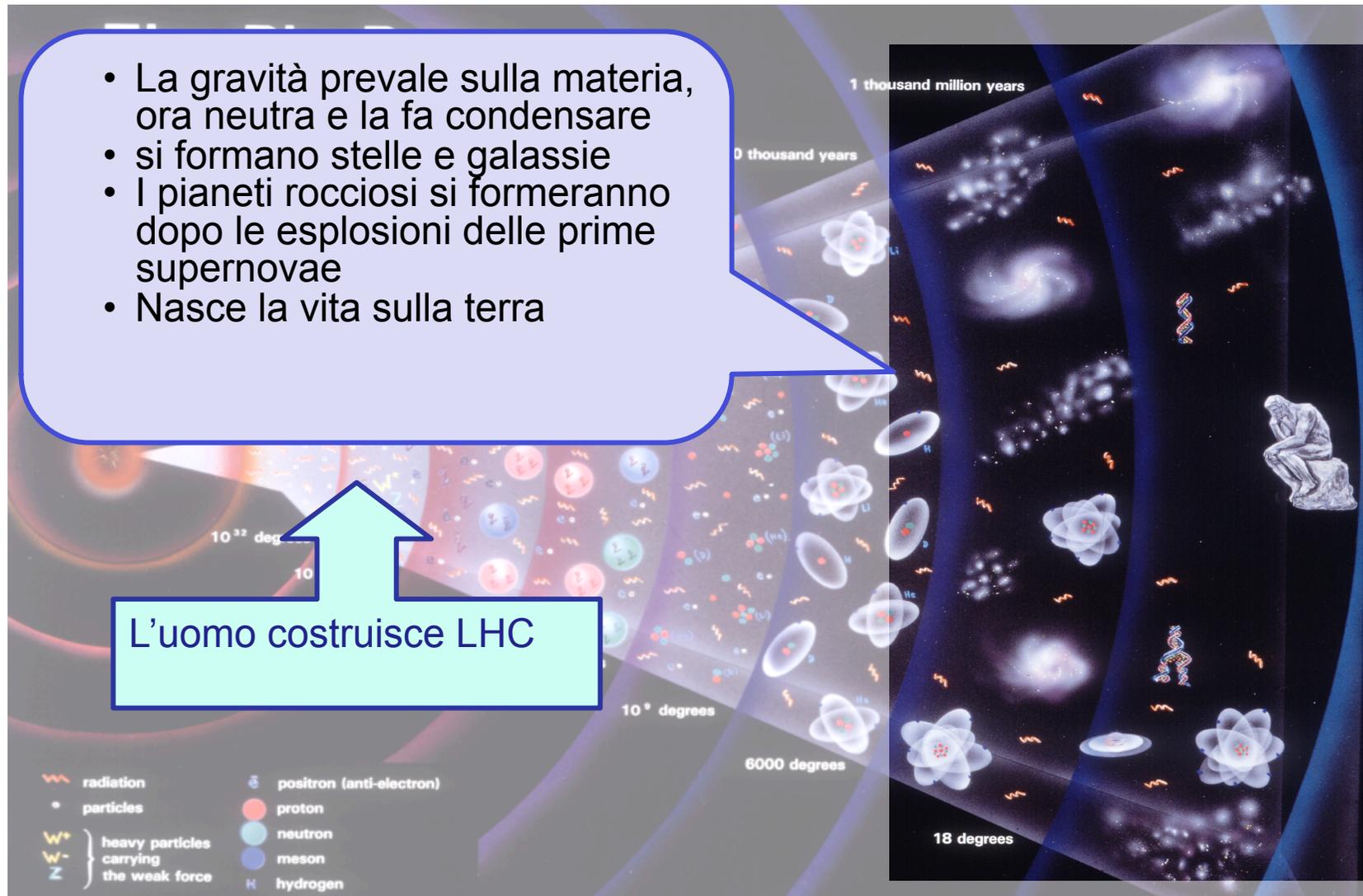
- Gli elettroni si combinano con i nuclei di idrogeno e di elio e per formare atomi neutri
- I fotoni si disaccoppiano dalla materia (radiazione di fondo), l'universo diventa trasparente



Galassie ($>10^6$ anni)

- La gravità prevale sulla materia, ora neutra e la fa condensare
- si formano stelle e galassie
- I pianeti rocciosi si formeranno dopo le esplosioni delle prime supernovae
- Nasce la vita sulla terra

L'uomo costruisce LHC





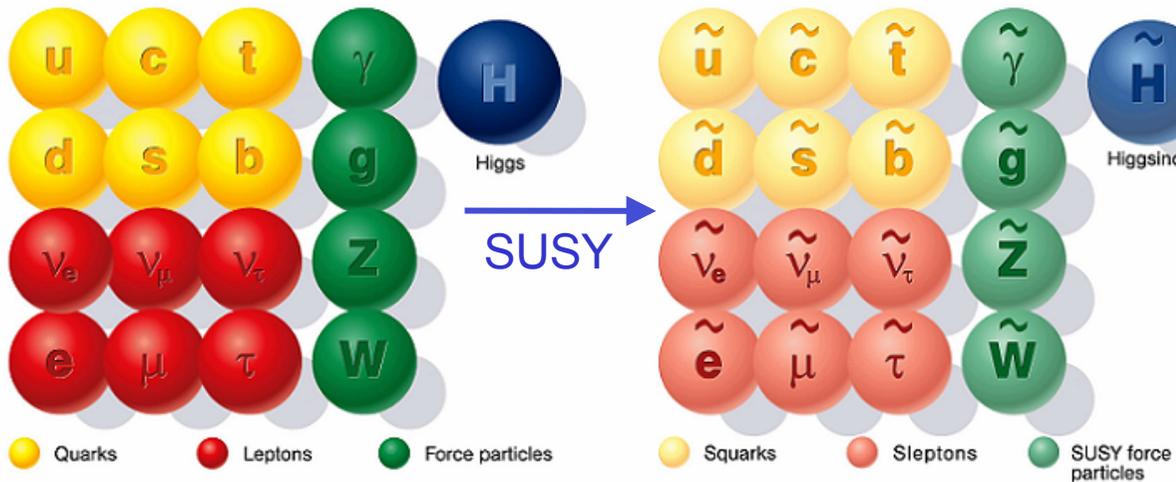
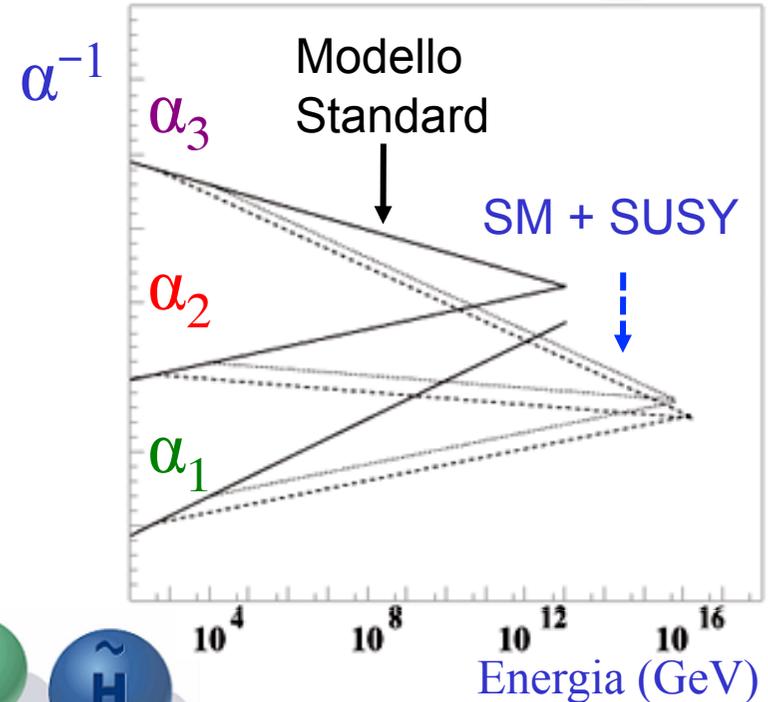
Altri problemi aperti



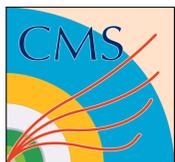
Unificazione e supersimmetria?



- Il Modello Standard non è compatibile, da solo con la grande unificazione
- Potrebbe essere necessario un ulteriore “ingrediente”: la supersimmetria?



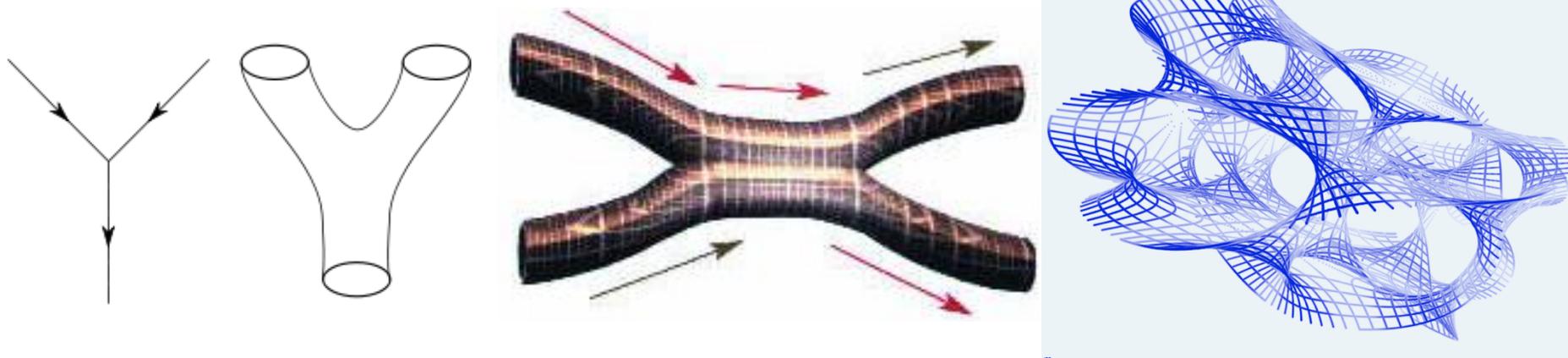
Lo spettro di particelle potrebbe moltiplicarsi con possibili osservazioni di nuove particelle ad LHC



Unificare anche la gravità?



- Unificare anche la gravità richiede sormontare difficoltà teoriche per la sua trattazione quantistica
- Una teoria in studio tratta le particelle come oggetti non puntiformi, ma come **stringhe**



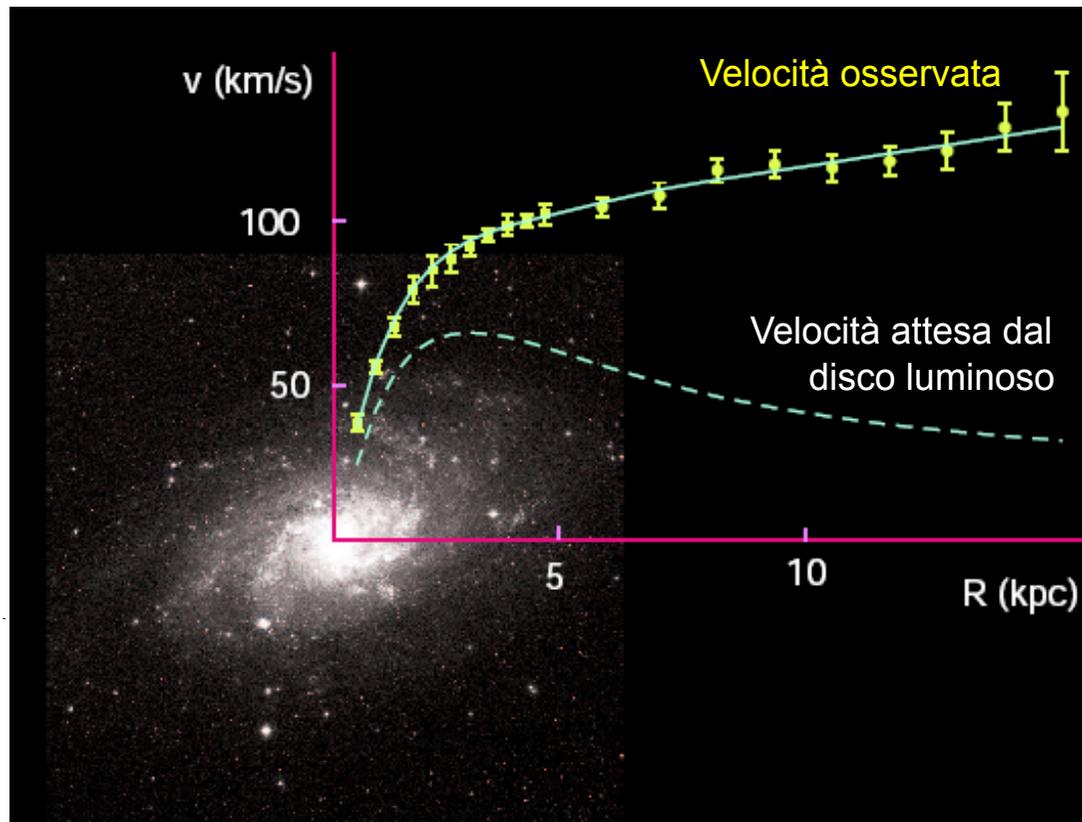
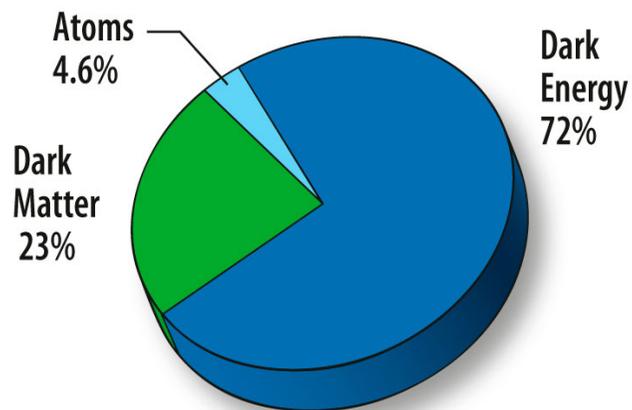
- Questi modello richiedono la presenza di **nuove dimensioni spazio-temporali**, e non sono ad oggi sufficientemente predittivi



La materia oscura



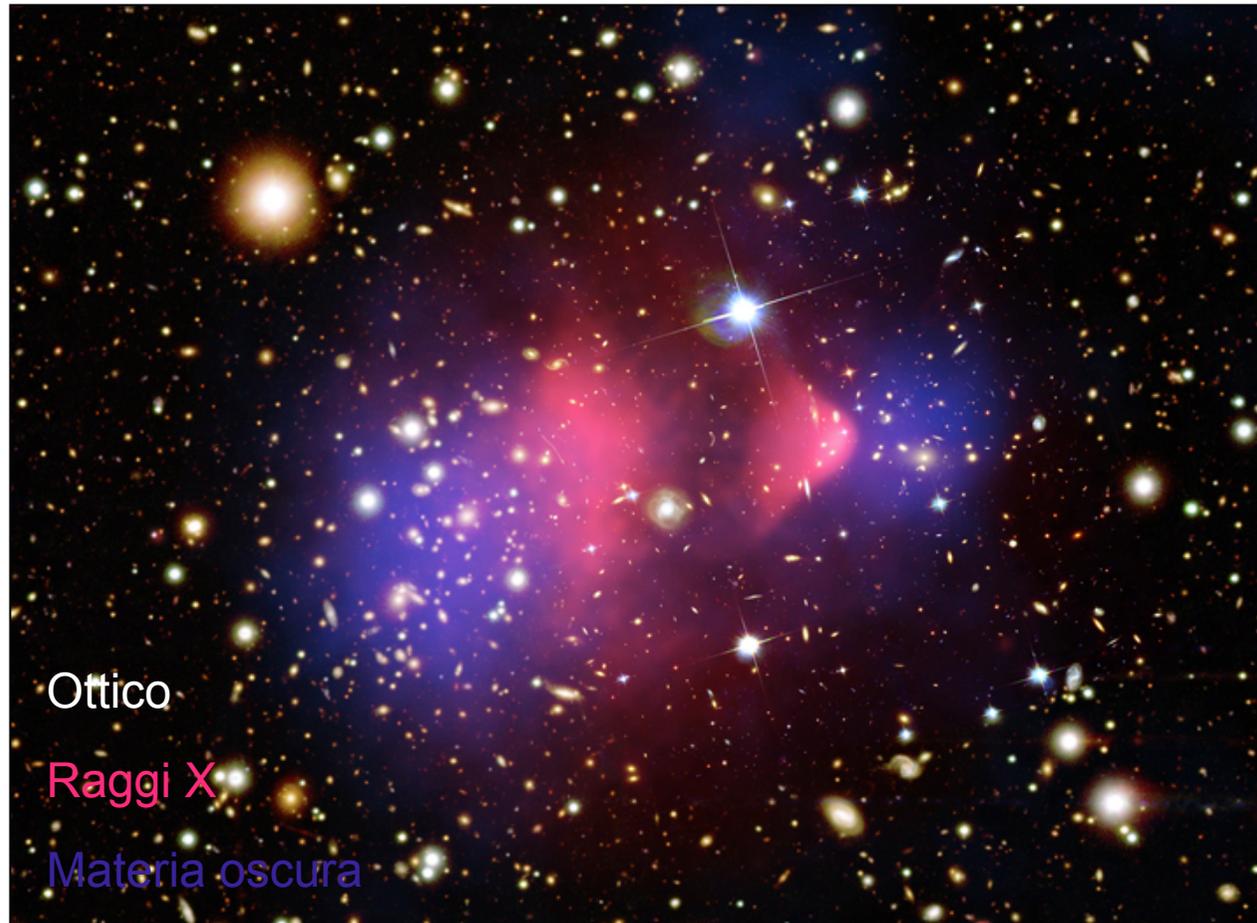
- Stelle e pianeti costituiscono **solo il 5%** circa della massa e dell'energia dell'universo
- La restante massa **non è visibile** direttamente, ma solo attraverso i suoi **effetti gravitazionali** sul moto delle stelle nelle galassie



Curva di rotazione della galassia M33



Una “foto” della materia oscura



Ottico

Raggi X

Materia oscura

*CHANDRA, X-ray galaxy cluster
1E 0657-56, bullet cluster*

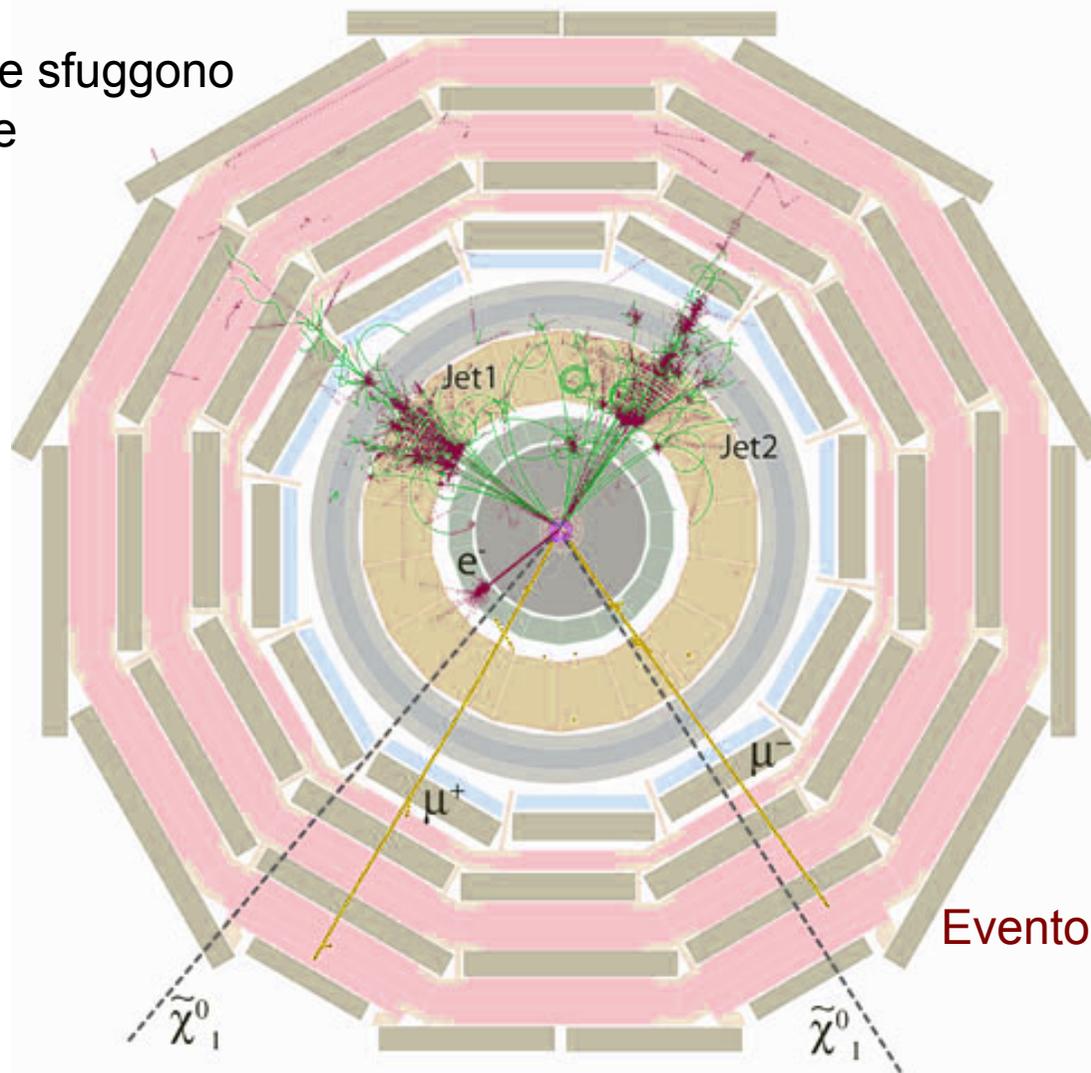
Due immagini: ai raggi X e guardando
l'effetto di lente gravitazionale



Un evento SUSY ad LHC



- Le particelle che sfuggono all'osservazione producono una energia mancante
- L'energia mancante si ricostruisce indirettamente dal bilancio di energia e momento





Struttura dello spazio-tempo



- Diverse teorie prevedono l'esistenza di **nuove dimensioni spaziali**
- Le nuove dimensioni non sono accessibili nella nostra esperienza perché “**compattificate**”, con raggi di curvatura molto piccoli
- La presenza di nuove dimensioni si può manifestare con uno spettro di **nuove particelle** rivelabili ad LHC





Il modello di Kaluza-Klein



- Negli anni '20 fu proposto un modello per **unificare gravità ed elettromagnetismo** aggiungendo una quinta dimensione

4x4: equazioni di Einstein ← → 4x1: equazioni di Maxwell

$$\hat{g}^{\hat{\mu}\hat{\nu}} = \begin{pmatrix} g^{\mu\nu} & -A^\mu \\ -A^\nu & -\frac{1}{\phi} + A^2 \end{pmatrix}$$

- Se la quinta dimensione è 'compattificata', non sarebbe visibile
- In più, la compattificazione fornisce la **quantizzazione della carica elettrica**
- Il modello fu abbandonato per difficoltà nella trattazione quantistica, ora è stata riconsiderata nell'ambito di modelli più complessi



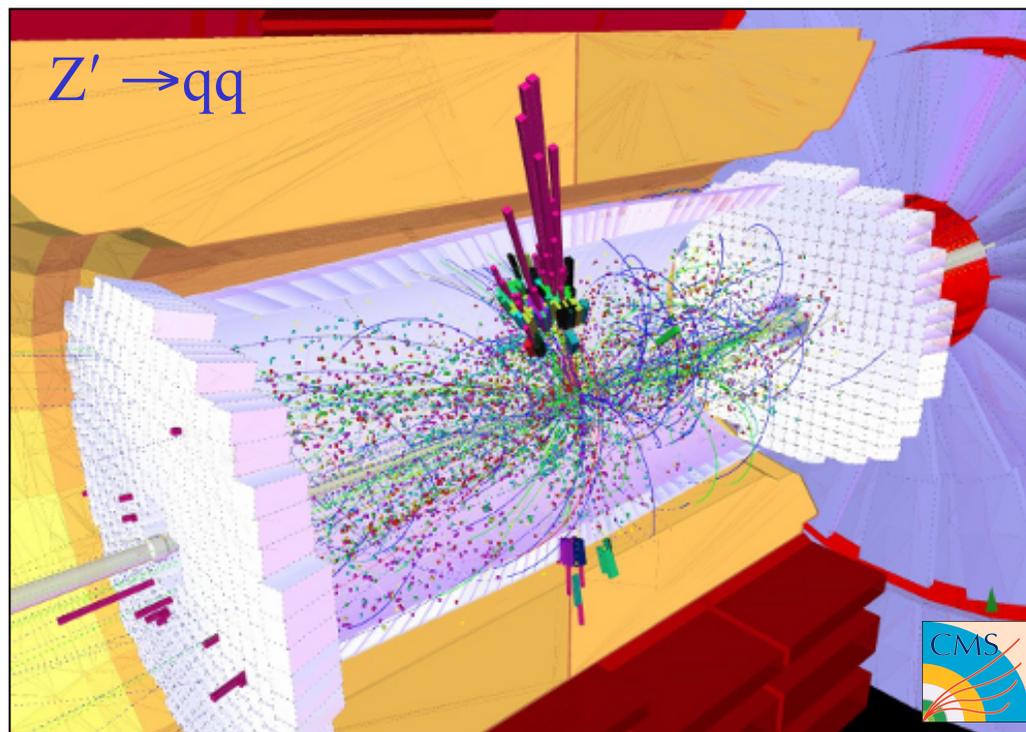
Particelle da extra dimensioni

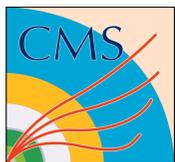


- Ogni tipo di particella corrisponderebbe, nello spazio a 4 dimensioni, ad uno spettro di particelle, eccitate nella quinta dimensione

$$m^2 = m_0^2 + \frac{n^2}{R^2}$$

- Il partner del fotone ($n=1$) potrebbe essere un candidato per la materia oscura
- Nuove particelle potrebbero essere prodotte direttamente ad LHC (es.: Z')





Conclusioni



- Il Modello Standard descrive tutte le particelle elementari e le interazioni note, ad eccezione della gravità
- Gran parte delle sue previsioni sono state verificate con gran precisione
- Manca l'osservazione del bosone di Higgs che potrebbe essere fatta ad LHC
- Restano aperti diversi problemi, tra cui la materia oscura, la grande unificazione, la trattazione quantistica della gravità
- LHC potrebbe fare luce su alcuni di questi problemi ancora aperti